

# Ergonomische Analyse von Informations- und Warnsystemen in sicherheitskritischen Arbeitskontexten am Beispiel des Gleisbaus

Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des akademischen Grades eines Doktors-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Michael Schultheis**

aus Langen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ralph Bruder

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder

Tag der Einreichung: 30.07.2015

Tag der mündlichen Prüfung: 20.10.2015

Darmstadt 2015

D17

## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbstständig verfasst habe.

---

Datum, Unterschrift

## **Vorwort**

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt.

An erster Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Doktorvater Prof. Dr. Ralph Bruder bedanken, Sie haben mir viel Freiraum für die Wahl meines Themas gelassen und mir durch Ihre Ratschläge geholfen, nicht den Überblick zu verlieren.

Vielen Dank auch an Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder für die Übernahme des Korreferates, durch Ihre Anmerkungen konnte ich viele Kapitel noch einmal klarer gestalten.

Vielen Dank an das Team des IADs. Die Gespräche haben mir an vielen Stellen geholfen, in der Arbeit voran zu kommen.

Danke auch an meine Gruppenleitung Michaela Kauer, die sich viel Zeit genommen hat, die Arbeit zu lesen und zu kommentieren. Hier wurden viele Schwierigkeiten aus der Welt geschafft und neue Motivation geschaffen.

Vielen Dank an mein Kompetenzteam mit Heike Märki, Thomas Pfeiffer und Andreas Röbig für die vielen Diskussionen und die Hilfestellungen.

Vielen Dank an Jurij Wakula und Rolf Helbig für die vielen Ratschläge, die mir geholfen haben, strukturiert vorgehen zu können.

Vielen Dank meinen Bürokollegen Christina König, Heike Märki, Marius Oberle, Marlene Helfert, Sinja Röbig und Thomas Pfeiffer für die vielen Blicke über den Bildschirmrand hinaus.

Großer Dank gebührt auch den vielen Studenten, deren wissenschaftliche Arbeiten mich beim Schreiben dieser Arbeit unterstützt haben.

Danke an Julia Glaser und Rebecca Spira für das Korrekturlesen der Arbeit.

Vielen Dank auch an meine Familie für die Unterstützung während der gesamten Promotionsphase.

Besonderen Dank schulde ich meiner Frau Steffi für die ausdauernde Unterstützung über die lange Zeit hinweg.

## **Zusammenfassung**

In nahezu allen Bereichen des alltäglichen Lebens gibt es Informations- bzw. Warnsysteme, die dabei helfen, Informationen zu übertragen oder vor Gefahren zu warnen. Besonders in sicherheitskritischen Arbeitskontexten ist es von Bedeutung, dass erfolgte Gefahrenmeldungen auch bei den gewünschten Empfängern ankommen. Immer wieder kommt es zu Unfällen, wenn eine Meldung nicht erkannt wird.

Diese Arbeit befasst sich mit individuellen Informations- bzw. Warnsystemen, das heißt Systeme, die von den betroffenen Personen am Körper getragen werden. Diese ermöglichen es, den Nutzer mit individuell auf die Situation angepassten Informationen bzw. Gefahrenmeldungen zu versorgen.

Ziel dieser Arbeit ist es, neue Konzepte mit Gestaltungshinweisen für individuelle Informations- bzw. Warnsysteme zu erarbeiten. Dabei sollen zwei Signale unterschiedlicher Dringlichkeit (der sehr dringliche „Alarm“ und die eher informierende „Warnung“) umgesetzt werden. Die Umsetzung der Lösungen geschieht zu den Bereichen „Erweckung der Aufmerksamkeit“ und „Übermittlung relevanter Informationen“. Die hierbei entstandenen Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen sind multimodal ausgelegt. Das heißt, es wird zur Übertragung der Signale auf unterschiedliche Signalgeber, über mehrere Sinneskanäle des Menschen, zurückgegriffen. Genutzt wird der visuelle, akustische und der taktile Kanal, wobei die akustischen Signale über Bone-Conduction (Knochenschall) übertragen werden. Die taktile Übertragung erfolgt über mechanische Schwingungen oder thermische Signale. Durch diese redundante Nutzung mehrerer Sinneskanäle soll eine sichere Signalübertragung auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen erreicht werden.

Außerdem schließt diese Arbeit die Erarbeitung von Konzepten zur Rückmeldung durch den Nutzer mit ein. Dieser Schritt ermöglicht die individuelle Erfassung der Handlungsintention des Nutzers. Dadurch kann auf falsch verstandene oder nicht erkannte Signale gezielt durch das Informations- bzw. Warnsystem reagiert werden.

Zur Prüfung der Gestaltungslösungen wird ein Versuchskonzept erarbeitet und anhand von zwei Studien angewendet. Anschließend erfolgt die Vorstellung und Diskussion der gewonnenen Ergebnisse.

Die Arbeit schließt mit einem Fazit und einem Ausblick zu den erarbeiteten Konzepten mit ihren Prototypen und Signalen.

## **Abstract**

In almost all areas of daily life, there are information or warning systems. These systems help to transfer information or to warn about danger. Particularly in safety-critical work contexts, it is important that transferred messages reach the desired recipients. Accidents occur again and again when a message is not recognized.

This dissertation deals with individual information or warning systems, which are carried by the person concerned. These make it possible to supply the user with customized messages based on the current situation.

The aim of this work is to provide newly developed concepts with design references for individual information and warning systems. Two signals of different urgency will be implemented, the very urgent „alarm“ and the more informative „warning“. The implementation of the solutions is done for the two steps „awakening of attention“ and „transmission of relevant information“. The resulting concepts with their prototypes and signals are designed in a multimodal way. That means the transferred signals are based on different signal generators for several sensory channels of the human being. Here the visual, acoustic and tactile channels are used. The acoustic signals are transmitted via bone conduction and the tactile signals via mechanical vibrations or thermal signals. Redundant use of multiple sensory channels allows a signal transmission even under difficult working conditions.

In addition, this dissertation includes the development of concepts for feedback by the user. This allows the individual recording of the user's intention. Misunderstood or unrecognized signals targeted by the information and warning system can be reacted upon.

An attempt to test the design solutions will be the development and application of a testing concept based on two studies. The results are going to be presented and discussed.

The work closes with a conclusion and an outlook for the developed concepts with their prototypes and signals.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Ziele der Arbeit.....	1
1.2	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Stand der Forschung und Technik.....	4
2.1	Definition - Informations- bzw. Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten.....	4
2.2	Abgrenzung von zur Information bzw. Warnung geeigneten Wahrnehmungsarten des Menschen .....	5
2.2.1	Relevante Modelle im Bereich der Wahrnehmung .....	6
2.2.2	Visuelle Wahrnehmung .....	9
2.2.2.1	Farbwahrnehmung .....	9
2.2.2.2	Adaption.....	10
2.2.2.3	Gesichtsfeld .....	10
2.2.3	Akustische Wahrnehmung.....	11
2.2.4	Taktile Wahrnehmung .....	14
2.2.4.1	Mechanische Schwingungen.....	15
2.2.4.2	Thermische Wahrnehmung.....	16
2.3	Analyse von Informations- bzw. Warnsystemen.....	17
2.3.1	Einführung wichtiger Gestaltungsfaktoren.....	21
2.3.1.1	Wahrnehmbarkeit.....	21
2.3.1.2	Unterscheidbarkeit .....	21
2.3.1.3	Dringlichkeit .....	22
2.3.2	Einteilung von Informations- bzw. Warnsystemen .....	22
2.3.2.1	Kollektive Systeme .....	23
2.3.2.2	Individuelle Systeme.....	24
2.3.3	Grundsätzliche Informations- bzw. Warnstrategien .....	26

2.3.3.1	Simultane Strategie .....	27
2.3.3.2	Kaskadierte Strategie .....	28
2.3.3.3	Fazit .....	29
2.3.4	Relevante Signale .....	29
2.3.4.1	Warnung.....	31
2.3.4.2	Alarmierung .....	31
2.4	Kontext Gleisbau .....	32
2.4.1	Arbeitssystem .....	32
2.4.2	Umgebungsbedingungen .....	33
2.4.3	Arbeitsaufgabe, Arbeitsmittel und Arbeitsobjekte .....	34
2.5	Analyse bestehender Systeme und Signale .....	35
2.5.1	Gleisbau .....	35
2.5.2	Weitere Informations- bzw. Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten.....	38
2.6	Defizite an bestehenden Informations- bzw. Warnsystemen .....	40
3	Entwicklung von Konzepten für Informations- und Warnsysteme.....	45
3.1	Modell für Informations- und Warnsysteme .....	45
3.2	Forschungsfragen .....	47
3.3	Gestaltungshinweise zur Erweckung der Aufmerksamkeit.....	50
3.3.1	Visuelle Signaldarbietung.....	50
3.3.1.1	Positionierung des Signalgebers .....	50
3.3.1.2	Farbauswahl .....	51
3.3.1.3	Positionskodierung der Signale .....	54
3.3.1.4	Signalkodierung über Blinkeffekte .....	55
3.3.1.5	Adaptive Regelung der Leuchtstärke visueller Signale.....	55
3.3.2	Akustische Signaldarbietung .....	57
3.3.2.1	Übertragungsweg der Signale .....	57
3.3.2.2	Wahrnehmbarkeit der Signale .....	59

3.3.2.3	Unterscheidbarkeit der Signale .....	60
3.3.2.4	Dringlichkeit der Signale .....	61
3.3.3	Taktile Signaldarbietung .....	63
3.3.3.1	Signalübertragung über thermische Reize .....	63
3.3.3.2	Signalübertragung über mechanische Schwingungen .....	64
3.4	Gestaltungshinweise zur Übermittlung relevanter Informationen .....	65
3.4.1	Informationsdarbietung über visuelle Displays .....	65
3.4.1.1	Positionierung des Displays .....	66
3.4.1.2	Farbdarstellung .....	67
3.4.1.3	Iconentwicklung .....	69
3.5	Gestaltungshinweise zur Rückmeldung durch den Nutzer .....	71
3.6	Entwickelte Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen .....	72
3.6.1	Entwicklung anhand des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses .....	72
3.6.2	Erweckung der Aufmerksamkeit .....	73
3.6.2.1	Anforderungen an visuelle Prototypen .....	74
3.6.2.2	Visuelle Prototypen und Signale .....	75
3.6.2.3	Anforderungen an akustische Prototypen .....	80
3.6.2.4	Akustische Prototypen und Signale .....	81
3.6.2.5	Anforderungen an thermische Prototypen .....	85
3.6.2.6	Thermischer Prototyp und Signale .....	86
3.6.2.7	Anforderungen an taktile Prototypen (mechanische Schwingungen) .....	88
3.6.2.8	Taktiler Prototyp und Signale (mechanische Schwingungen) .....	88
3.6.3	Übermittlung relevanter Informationen .....	90
3.6.3.1	Anforderungen an Displays und Icons .....	90
3.6.3.2	Prototypen und Icons zur Informationsdarbietung .....	91
3.6.4	Individuelle Rückmeldung durch den Benutzer .....	94
3.6.4.1	Anforderungen an eine individuelle Rückmeldung .....	95
3.6.4.2	Prototypen eines Rückmeldungsinterfaces .....	96



---

4	Entwicklung eines Versuchskonzeptes.....	101
4.1	Grundsätzliches Konzept.....	101
4.2	Versuchsbedingungen.....	102
4.3	Arbeitsaufgabe.....	105
4.4	Wahl der Probanden .....	106
4.5	Methoden zur Erhebung der Ergebnisse.....	108
4.6	Versuchsablauf .....	110
5	Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse.....	113
5.1	Entdeckbarkeit und Erkennbarkeit der Signale .....	113
5.1.1	Diskussion .....	116
5.1.2	Fazit .....	117
5.2	Unterscheidbarkeit der Signale.....	118
5.2.1	Diskussion .....	122
5.2.2	Fazit .....	125
5.3	Rückmeldung zur Unterscheidung zwischen den beiden Signalen.....	125
5.3.1	Diskussion .....	130
5.3.2	Fazit .....	131
6	Methodische Diskussion.....	132
6.1	Vorgehen während der Entwicklung der Konzepte.....	132
6.2	Eignung des Versuchskonzeptes .....	133
6.2.1	Ergebnisse aus den beiden Studien.....	133
6.2.2	Diskussion .....	135
6.3	Vorgehen bei der Entwicklung und mögliche Verbesserungen des Versuchskonzeptes .....	137
7	Fazit und Ausblick.....	139
7.1	Relevanz für die Forschung.....	139
7.2	Auswirkungen auf die Praxis.....	140
7.3	Zukünftige Fragen .....	141

---

8	Literaturverzeichnis .....	143
8.1	Vorschriften und Normen .....	152
8.2	Internetquellen .....	154
9	Anhang .....	156
9.1	Fragebogen zu den Studien .....	156

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 C-HIP Modell (Wogalter, 2006b) .....	6
Abbildung 2 Drei Stufen AKC Modell (Laughery & Wogalter, 2014) .....	7
Abbildung 3 Einfaches Handlungsmodell nach Luczak (1975) .....	7
Abbildung 4 Informationsverarbeitungsmodell (Wickens & Hollands, 2000) .....	8
Abbildung 5 Spektrum des sichtbaren Lichtes (Stapelkamp, 2007) .....	9
Abbildung 6 Gesichtsfeld, Sehachse nicht durch externe Arbeitsanforderungen vorgegeben (DIN EN 842) .....	11
Abbildung 7 Aufbau des Ohres (Zenner, 2006) .....	11
Abbildung 8 Übertragungswege Bone Conduction und Luftschall (Abb. nach Kahle & Frotscher, 2002) .....	12
Abbildung 9 Positionierung des Vibrationsgebers (McBride et al., 2005) .....	12
Abbildung 10 Isophone der menschlichen Wahrnehmung (Klinke et al., 2010) .....	13
Abbildung 11 Hörschwellenverschiebung bei Lärmschwerhörigkeit und Altersschwerhörigkeit (Schlick et al., 2010) .....	14
Abbildung 12 Aufbau der Haut mit Rezeptoren (Klinke et al., 2010) .....	15
Abbildung 13 Prozess zur Risikominderung aus Sicht des Konstrukteurs (DIN EN ISO 12100) .....	18
Abbildung 14 Prinzipieller Ablauf einer Informations- bzw. Warnübertragung (Laughery & Wogalter, 2014) .....	19
Abbildung 15 Simultane Signalübertragung .....	28
Abbildung 16 Signalübertragung durch Kaskaden .....	29
Abbildung 17 Rottenwarnsignale (DGUV Vorschrift 78) .....	30
Abbildung 18 Arbeitssystemmodell (Schlick et al., 2010) .....	32
Abbildung 19 Sperrung des Arbeitsgleises (DGUV Information 201-021) .....	36
Abbildung 20 Kollektives Warnsystem (DGUV Information 201-021) .....	37
Abbildung 21 Individuelles Warnsystem (Schweizer, 2006) .....	37
Abbildung 22 RES.Q ein Alarmierungssystem mit Rückmeldung durch den Nutzer (Swissphone Telecommunications GmbH, 2014) .....	39
Abbildung 23 Tragbares Gaswarngerät (Industrial Scientific, 2015) .....	39
Abbildung 24 D2SENSE Warnsystems (Lewandowski, 2015) .....	40
Abbildung 25 Mensch-Maschine Modell für Informations- und Warnsysteme (in Anlehnung an (Wickens & Hollands, 2000 und Johannsen, 1993) .....	46
Abbildung 26 Einstellung der Signalhelligkeit durch Pulsweitenmodulation .....	56

Abbildung 27 Akustische Signalgeber und deren Einsatz (Neudörfer, 2013) .....	60
Abbildung 28 Warnungsdesign (nach Patterson, 1982) .....	61
Abbildung 29 Empfindlichkeit gegenüber Kaltreizen (Hartmann & Miller, 2013; Stevens & Choo, 1998; von Campenhausen, 1981b).....	64
Abbildung 30 Icons aus der StVO (ADAC e.V., 2014) .....	70
Abbildung 31 Menschzentrierter Gestaltungsprozess nach (DIN EN ISO 9241-210).....	72
Abbildung 32 Erste Prototypen: Warnweste und Sicherheitsbrille (Ringwald, Saul, Wagner, Wedel, & Wurst, 2011).....	76
Abbildung 33 Erste Prototypen: Helm und Armband (Kwiotek, Schad, Yanza, & Casteels, 2011).....	76
Abbildung 34 LED-Schutzbrille (links und mitte (Blümel, 2014)) .....	78
Abbildung 35 CAD-Zeichnung der LED-Platine (Blümel, 2014) .....	78
Abbildung 36 akustische Signalgeber (Luftschall) (Kwiotek et al., 2011; Ringwald et al., 2011; Sennheimer.com).....	82
Abbildung 37 akustische Signalgeber (Bone Conduction).....	83
Abbildung 38 Peltier-Element (Sommerlatte et al., 2007) .....	86
Abbildung 39 Peltiergürtel für die Übermittlung der Kaltreize (Hartmann & Miller, 2013)...	86
Abbildung 40 Einstellung der Reiztemperatur (Hartmann & Miller, 2013) .....	87
Abbildung 41 Bauch-Rückengürtel zur Übertragung der mechanischen Schwingungen (Hartmann & Miller, 2013) .....	89
Abbildung 42 HMD kombiniert mit einer Schutzbrille (Kellersmann, 2012) .....	92
Abbildung 43 Display am Handgelenk .....	92
Abbildung 44 Finale Versionen des Alarmierungs- und Warnicons (Tondera, 2013).....	94
Abbildung 45 Rückmeldung über physikalische Tasten (Heidl, 2011).....	97
Abbildung 46 Rückmeldung über eine Eingabekombination .....	98
Abbildung 47 Rückmeldung über die Nutzung von Gesten (rechts (Ballweg, 2013)).....	99
Abbildung 48 Labor erste Studie.....	103
Abbildung 49 Labor zweite Studie.....	104
Abbildung 50 Arbeitsaufgabe - Bau einer Holzhütte .....	106
Abbildung 51 Handlungsreaktionen in Folge der Gefahrenmeldungen (links: Warnung; rechts: Alarmierung).....	110
Abbildung 52 Wird das Signal „Alarm“ (oben) und „Warnung“ (unten) deutlich erkennbar über die LED-Brille dargestellt?.....	115

Abbildung 53 Wird das Signal „Alarm“ (oben) und „Warnung“ (unten) deutlich erkennbar über das Bone Conduction-Interface dargestellt?.....	116
Abbildung 54 Können die visuellen- (oben) bzw. akustischen Signale (unten) für die Zustände „Alarm“ und „Warnung“ problemlos unterschieden werden?.....	118
Abbildung 55 Das verwendete Icon ist zur Darstellung der Meldung „Alarm“ (oben) bzw. „Warnung“ (unten) angemessen. ....	120
Abbildung 56 Das verwendete akustische Signal eignet sich für die Darstellung einer „Alarm“ Meldung (oben) bzw. „Warnung“ Meldung (unten). ....	121
Abbildung 57 Das akustische Signal der Meldung „Alarm“ wirkt dringlicher als das der Meldung „Warnung“ .....	121
Abbildung 58 Die Bedienung des Rückmeldesystems insgesamt ist einfach .....	126
Abbildung 59 Bei Eingabe der Rückmeldung über das Grid sind Probleme aufgetreten .....	126
Abbildung 60 Die Eingabe des Musters „Alarm“ (oben) bzw. „Warnung“ (unten) ist unproblematisch. ....	127
Abbildung 61 Die Helligkeit der Umgebung hat bei Eingabe der Rückmeldung am Display gestört .....	129
Abbildung 62 Während der Bearbeitung der Arbeitsaufgabe wurde bereits auf das nächste Signal gewartet .....	134
Abbildung 63 Die Arbeitsaufgabe forderte zur Bearbeitung die volle Aufmerksamkeit der Probanden .....	134
Abbildung 64 Stellte die Arbeitsaufgabe stellte eine Überforderung dar?.....	135
Abbildung 65 Die Abstände zwischen den Signalen waren zu kurz .....	135

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Rezeptoren der Haut mit Beschreibung (Klinke et al., 2010) .....	16
Tabelle 2 Vergleich der vorgestellten Informations- bzw. Warnsystemen .....	40
Tabelle 3 Schema der Farben visueller Signale (DIN EN 981) .....	52
Tabelle 4 Farbabstandsrechnung im Luv Farbraum .....	53
Tabelle 5 Gestaltung der Dringlichkeit (Malter & Guski, 2001) .....	62
Tabelle 6 Darstellung der Verkehrs- und Signalfarben (RAL, 2014) .....	68
Tabelle 7 Farbabstände der verwendeten Iconfarben im $L_{uv}$ Farbraum .....	69
Tabelle 8 Signale über LED-Brille .....	79
Tabelle 9 Demographische Daten erste Studie .....	107
Tabelle 10 Demographische Daten zweite Studie .....	108
Tabelle 11 Die vier Fälle der Signalentdeckungstheorie in Anlehnung an Wickens (2002) .	109
Tabelle 12 Verteilung der Zeiten bis zur Aktivierung des Rückmeldungsinterfaces .....	122
Tabelle 13 Verteilung der Anzahl der Anläufe bis zur erfolgreichen Beendigung der Rückmeldung .....	128
Tabelle 14 Verteilung der Interaktionszeiten bis zur erfolgreichen Beendigung der Rückmeldung .....	129

**Abkürzungsverzeichnis**

App	Applikation
HMD	Head mounted display
PSA	persönliche Schutzausrüstung
PWM	Pulsweitenmodulation

In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich die männliche Schreibweise verwendet. Die Betrachtungen schließen weibliche Personen in gleichem Maße mit ein.

## 1 Einleitung

In vielen Bereichen des alltäglichen Lebens tauchen Gefahren auf, vor denen der Mensch geschützt werden muss. Eine Möglichkeit einen wirkungsvollen Schutz zu bieten, ist der Einsatz von Informations- bzw. Warnsystemen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einer speziellen Ausprägung von Informations- bzw. Warnsystemen, nämlich den individuellen Systemen. Solche Systeme werden von der betreffenden Person am Körper getragen und können so individuell an die Person gerichtete Meldungen übermitteln. Im Fokus dieser Arbeit liegen Anwendungsfelder individueller Informations- bzw. Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten, wie es z.B. im Gleisbau der Fall ist.

Wie schwierig es sein kann in solch einem Kontext zu warnen, belegt ein Unfall im Jahre 2011, bei dem aus ungeklärter Ursache das automatische Warnsignal nicht wahrgenommen werden konnte. Dabei kam ein Bauarbeiter ums Leben (Scholz & Schombierski, 07.03.2011).

Dieses einleitende Kapitel soll einen Überblick der Ziele der Arbeit liefern (vgl. Kapitel 1.1), darüber hinaus wird der Aufbau der Arbeit beschrieben (vgl. Kapitel 1.2).

### 1.1 Ziele der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist, neue Lösungsansätze für individuelle Informations- bzw. Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten zu finden. Dazu werden zuerst aktuelle Systeme vorgestellt (vgl. Kapitel 2.5) und Defizite aufgezeigt (vgl. Kapitel 2.6). Durch die Analyse der Defizite konnten Forschungsfragen formuliert werden, deren Beantwortung Gestaltungshinweise zu neuen Informations- bzw. Warnsystemen liefert. Folgende Forschungsfragen wurden aufgestellt (vgl. Kapitel 3.2):

1. Wie können multimodale Signale gestaltet werden, um in sicherheitskritischen Arbeitskontexten eine geeignete Entdeckbarkeit und Erkennbarkeit zu erreichen?
2. Welche Maßnahmen verbessern die Unterscheidbarkeit von multimodalen Signalen in sicherheitskritischen Arbeitskontexten?
3. Wie kann eine Rückmeldung durch den Nutzer aussehen, die es ermöglicht herauszufinden, ob richtig zwischen den Signalen unterschieden wurde?

Aus den erarbeiteten Gestaltungshinweisen sollen Konzepte mit Prototypen und Signalen generiert werden. Um diese anhand eines definierten Arbeitskontextes aufstellen zu können, ist innerhalb dieser Arbeit der Gleisbau als Vertreter der sicherheitskritischen Arbeitskontexte gewählt worden. Geplant ist die Umsetzung der Signale „Alarm“ und „Warnung“ mit unter-



schiedlicher Bedeutung und Dringlichkeit. Angesprochen werden sollen der visuelle, der akustische und der taktile Sinneskanal des Menschen. Darüber hinaus soll ein Konzept zur Rückmeldung des Nutzers an das Informations- bzw. Warnsystem erarbeitet werden. Dieses ermöglicht es, die Handlungsintention des Nutzers zu erfassen und gegebenenfalls darauf zu reagieren. Zur Prüfung der Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen wird ein Versuchskonzept entwickelt.

Für das taktile Konzept sollen innerhalb der Arbeit noch keine finalen Prototypen und Signale erarbeitet werden. In diesem Bereich existieren nur wenig Vorarbeiten, weswegen in dieser Arbeit nur die grundsätzliche Eignung der Konzepte während der iterativen Vorstudien geprüft werden soll. Die Weiterentwicklung und Integration in das Gesamtkonzept ist nicht Teil dieser Arbeit.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an den im vorherigen Kapitel genannten Zielen. Dazu liefert Kapitel 1 wie bereits beschrieben eine kurze Einleitung in das Thema und umreißt die Ziele und den Aufbau der Arbeit.

Kapitel 2 liefert die Grundlagen dieser Arbeit. Hier wird zunächst die Begrifflichkeit „Informations- bzw. Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten“ definiert und eingeordnet. Es findet eine Einführung der benötigten Sinnesorgane mit ihren Eigenheiten statt. Bestehende Informations- bzw. Warnsysteme werden analysiert und Besonderheiten aktueller Warnstrategien herausgearbeitet. Außerdem erfolgt die Beschreibung der innerhalb der Arbeit verwendeten Signale „Alarm“ und „Warnung“. Abschließend werden bestehende Informations- bzw. Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten vorgestellt und die Defizite aufgezeigt.

Kapitel 3 beschreibt die Entwicklung der Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen. Dazu wird zunächst ein Modell für Informations- bzw. Warnsysteme eingeführt und es erfolgt die Vorstellung der Forschungsfragen. Anschließend werden Gestaltungshinweise gegeben. Diese sowie die anschließende Entwicklung der Konzepte sind in drei Bereiche gegliedert, zunächst die „Erweckung der Aufmerksamkeit“, gefolgt von der „Übermittlung relevanter Informationen“ und zuletzt der „Rückmeldung durch den Benutzer“. Bis zum Ende des Kapitels entsteht so sukzessive ein vollständiges, individuelles Informations- bzw. Warnsystem.

Kapitel 4 beschreibt die Entwicklung des Versuchskonzeptes. Hier wird erläutert, welche Art von Labor zum Einsatz kommt, es werden Umgebungsbedingungen definiert, eine Arbeits-

aufgabe gefunden und geeignete Probanden ausgewählt. Es folgt die Auswahl von Methoden zur Erhebung der Ergebnisse und die genaue Beschreibung des Ablaufs der durchgeführten Versuche.

Kapitel 5 stellt die Ergebnisse der Forschungsfragen vor. Dies geschieht für jede Forschungsfrage einzeln, wobei die Fragen so gewählt sind, dass die Themenschwerpunkte aufeinander aufbauen. Nach jeder Forschungsfrage werden die Ergebnisse dieser noch einmal kritisch diskutiert.

In Kapitel 6 folgt die generelle methodische Diskussion der Arbeit. Dies beinhaltet die kritische Auseinandersetzung mit dem Vorgehen bei der Entwicklung der Informations- bzw. Warnkonzepte und bei der Entwicklung des Versuchskonzeptes.

Im letzten Kapitel soll ein Fazit zu den gewonnenen Erkenntnissen bezüglich der Relevanz für die Forschung gezogen werden. Darüber hinaus wird ein Ausblick gegeben, welche Auswirkungen die Erkenntnisse dieser Arbeit für die Praxis haben könnten und welche Fragestellungen sich für zukünftige Arbeiten ergeben haben.

## 2 Stand der Forschung und Technik

Dieses Kapitel fasst zunächst die Grundlagen, die zur Gestaltung und Erprobung von Informations- und Warnsystemen notwendig sind, zusammen. Das Kapitel beginnt mit der Definition der Begrifflichkeit „Informations- bzw. Warnsystem in sicherheitskritischen Arbeitskontexten“ (vgl. Kapitel 2.1). In Kapitel 2.2 findet eine Einleitung und Analyse der relevanten Modelle menschlicher Informationsverarbeitung statt. Anschließend sollen Wahrnehmungsarten des Menschen, die für den Einsatz von Informations- bzw. Warnübertragung geeignet wären, näher betrachtet werden. Die Gliederung erfolgt anhand der visuellen (vgl. Kapitel 2.2.2), akustischen (vgl. Kapitel 2.2.3) und taktilen Wahrnehmung (vgl. Kapitel 2.2.4) des Menschen.

In Kapitel 2.3 erfolgt die allgemeine Analyse von Informations- bzw. Warnsystemen. Dazu werden zu Beginn wichtige Gestaltungsfaktoren eingeführt (vgl. Kapitel 2.3.1). Anschließend erfolgt eine Einteilung der Systeme (vgl. Kapitel 2.3.2), die Vorstellung grundsätzlicher Strategien (vgl. Kapitel 2.3.3) sowie die Vorstellung der für diese Arbeit relevanten Signale (vgl. Kapitel 2.3.4).

In Kapitel 2.4 wird näher auf den Arbeitskontext des Gleisbaus eingegangen, der die Arbeit als Praxisbeispiel begleiten soll.

Kapitel 2.5 analysiert bestehende Informations- bzw. Warnsysteme. Hier findet eine Untergliederung der Systeme aus dem Gleisbau (vgl. Kapitel 2.5.1) und Systemen aus weiteren sicherheitskritischen Arbeitskontexten (vgl. Kapitel 2.5.2) statt.

In Kapitel 2.6 geht es abschließend darum, Defizite an bestehenden Informations- bzw. Warnsystemen darzustellen und aufzuzeigen, dass neue Ansätze möglich sind.

### 2.1 Definition - Informations- bzw. Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten

In diesem Kapitel sollen zunächst die beiden Begriffe Informationssystem und Warnsystem definiert werden. Eine geeignete Definition zu Informationssystemen aus dem Bereich der Informatik liefert Schönsleben (2013):

„System gebildet durch

- Sammlungen von zusammengehörigen Informationen in strukturierter Form.
- Kommunikation, d.h. Zusammenwirken, Interaktion und Vermittlung der Informationen des Systems zu definierten Zwecken, innerhalb des Systems und nach außen.“

Ein Warnsystem wird laut ERRI A 158/RP 3 Teil I (1996) wie folgt beschrieben:

„Einrichtung, die Personen bei Arbeiten im Gleis oder in dessen Nähe vor der Gefahr sich nähernder Schienenfahrzeuge im Arbeits- oder Nachbargleis rechtzeitig warnt“

In dieser Arbeit soll das Warnsystem genau wie in der zuvor beschriebenen Definition vor bestimmten Gefahren warnen. Um dies zu erreichen, müssen, wie in der Definition des Informationssystems beschrieben, die Informationen in strukturierter Form (z.B. Welche Gefahr liegt vor?) vorliegen. Zusätzlich muss die Kommunikation mit dem Nutzer des Systems wie beim Informationssystem klar geregelt sein, damit keine Meldungen verpasst werden können. Zusammenfassend funktionieren Warnsysteme ähnlich wie Informationssysteme, nur ist hier zu gewährleisten, dass die Meldungen wirklich beim Nutzer ankommen und dieser richtig reagiert.

Sicherheitskritische Arbeitskontexte machen die Anforderungen an ein Informations- bzw. Warnsystem zu einem komplexen Regelwerk, da sämtliche Informationen miteinbezogen werden müssen, um eine sichere Übertragung der Meldungen zu gewährleisten. Gerade Systeme, die mehrere Informations- bzw. Warnmeldungen mit unterschiedlichen Bedeutungen übertragen sollen, müssen sämtliche Umgebungsbedingungen und Störeinflüsse berücksichtigen. Wie diese Arbeit dazu beitragen kann individuelle Informations- bzw. Warnsysteme in komplexen Arbeitsbedingungen zukünftig besser zu gestalten, soll im folgenden Kapitel kurz beschrieben werden.

## 2.2 Abgrenzung von zur Information bzw. Warnung geeigneten Wahrnehmungsarten des Menschen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den für Informations- und Warnsysteme geeigneten Wahrnehmungsarten des Menschen. Dabei wird zuerst auf die menschliche Wahrnehmung eingegangen. In diesem Zusammenhang existieren Handlungsmodelle und Informationsverarbeitungsprozesse, die es ermöglichen, Besonderheiten bei der Wahrnehmung besser einordnen zu können.

Anschließend sollen die für sicherheitskritische Arbeitskontexte relevanten Wahrnehmungsarten näher vorgestellt werden. Dabei handelt es sich um die visuelle, die akustische (Cohen, H.H., Cohen, J., Mendat, C.C., Wogalter, M.S., 2006) und die taktile Wahrnehmung. Olfaktorisch oder gustatorisch zu informieren oder zu warnen wäre sicherlich in eingeschränkten Situationen auch möglich (Wogalter, 2006b), soll hier aber nicht weiter betrachtet werden. Im Bereich des Gleisbaus wären diese Wahrnehmungsarten bei den komplexen Umgebungsbedingungen nicht sicher genug. Auch der Einsatz von elektrischen Reizen soll in dieser Arbeit

nicht behandelt werden, da es bereits ein Forschungsvorhaben der Universität in Dresden gibt, das in diesem Feld Erkenntnisse sammelt (Bärenz, Reichelt, & Manteuffel, 2014).

### 2.2.1 Relevante Modelle im Bereich der Wahrnehmung

Zu Beginn soll ein sehr differenziertes Modell aus dem Bereich der menschlichen Wahrnehmung vorgestellt werden. Es handelt sich um das „Communications and Information Processing Model“ (C-HIP) (Mayhorn, Wogalter, & Laughery, 2014; Noy & Karwowski, 2005; Salvendy, 2012; Wogalter, 2006a; Wogalter, DeJoy, & Laughery, 1999). Es beschreibt eine Mischung von Kommunikations- und Informationsverarbeitungsprozessen und wurde über die Jahre immer weiterentwickelt (siehe Abbildung 1).

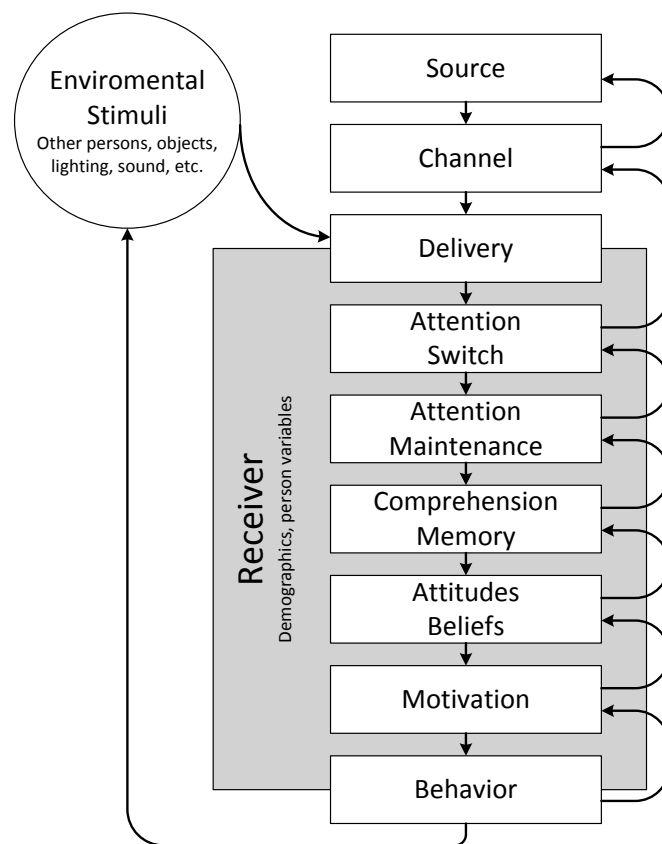


Abbildung 1 C-HIP Modell (Wogalter, 2006b)

Das C-HIP Modell zeigt anschaulich die Prozessschritte, die bei der Benutzung eines Informations- bzw. Warnsystems durchlaufen werden. Über verschiedene Kanäle (visuell, akustisch, taktil, etc.) übermittelt das System Signale an den Empfänger. Dieser nimmt die Signale über die Sinnesorgane auf, wobei dieser Schritt durch mögliche Umgebungseinflüsse (z.B. Lärm oder Rauch) beeinflusst wird (Wogalter, 2006a). An diesem Punkt ist es notwendig, die Aufmerksamkeit zu erwecken und in einem zweiten Schritt auch aufrechtzuerhalten. Nun muss die empfangene Information bzw. Warnung im Gehirn verarbeitet und der Inhalt ver-

standen werden (Wogalter, 2006a). Glaubt die Person den Inhalt der empfangenen Information bzw. Warnung, entsteht die Motivation, letztendlich ein der Information bzw. Warnung entsprechendes Verhalten zu zeigen (Kalsher & Williams, 2006; Wogalter, 2006a).

Das C-HIP Modell wurde zur leichteren Diskutierbarkeit in ein Dreistufenmodell überführt. Das AKC Modell (Laughery & Wogalter, 2014) besteht nur noch aus den drei Stufen „Attention“, „Knowledge“ und „Compliance“ (vgl. Abbildung 2 Drei Stufen AKC Modell (Laughery & Wogalter, 2014)).

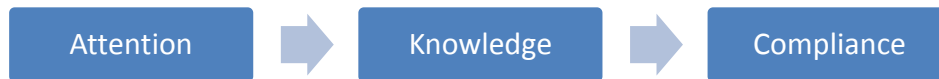


Abbildung 2 Drei Stufen AKC Modell (Laughery & Wogalter, 2014)

„Attention“ umfasst das Bemerken eines Informations- bzw. Warnungssignals, also den Zeitraum, bis die Aufmerksamkeit auf das Signal umschaltet. „Knowledge“ beinhaltet das Verstehen des Inhaltes der Information bzw. Warnung. Dies beinhaltet die kognitiven Prozesse, die bis zur ersten Tendenz einer Entscheidung anhalten. Abschließend erfolgt in der Stufe „Compliance“ die innere Zustimmung zur in der Information bzw. Warnung geforderten Handlung. Die betreffende Person sollte das Gefühl haben, eine richtige Entscheidung zu treffen (Laughery & Wogalter, 2014). Das Modell beschreibt den Ablauf aus Sichtweise der betreffenden Person.

Anwendung findet das AKC Modell innerhalb dieser Arbeit zur besseren Orientierung bei der Entwicklung der Prototypen. Genau wie im Modell werden diese nach den drei Stufen „Erweckung der Aufmerksamkeit“, „Übertragung der relevanten Informationen“ und „Rückmeldung durch den Nutzer“ gegliedert.

Als Ergänzung soll an dieser Stelle noch das einfache Handlungsmodell nach Luczak (1975) vorgestellt werden. Es ist in vier Stufen (vgl. Abbildung 3) gegliedert und ermöglicht gerade in den ersten beiden Schritten („Entdecken“ und „Erkennen“) eine bessere Differenzierbarkeit der Abläufe. Diese Untergliederung macht es in Kapitel 3.3 (Gestaltungshinweise zur Erweckung der Aufmerksamkeit) leichter, geeignete Anforderungen für die einzelnen Konzepte aufzustellen.



Abbildung 3 Einfaches Handlungsmodell nach Luczak (1975)



Nach Betrachtung der relevanten Modelle sollen nun die maßgeblichen Sinneskanäle (visuell, akustisch und taktil) beschrieben werden.

### 2.2.2 Visuelle Wahrnehmung

Die visuelle Wahrnehmung stellt für den Menschen die wichtigste Modalität dar. 80% bis 90% aller Informationen werden über das Auge übermittelt (Bokranz & Landau, 1991). Eine anschauliche Übersicht über den Aufbau des Auges liefert Clauss und Clauss (2009). Die Funktionen der einzelnen Bestandteile liefert Eysel (2006) in seinen Ausführungen.

In den nun folgenden Unterkapiteln soll gezielt näher auf die Funktionen der Farbwahrnehmung, der Adaption sowie auf das Gesichtsfeld eingegangen werden. Deren Kenntnis ist für die spätere Auslegung der Konzepte von Bedeutung, um die Wahrnehmung der Signale zu ermöglichen.

#### 2.2.2.1 Farbwahrnehmung

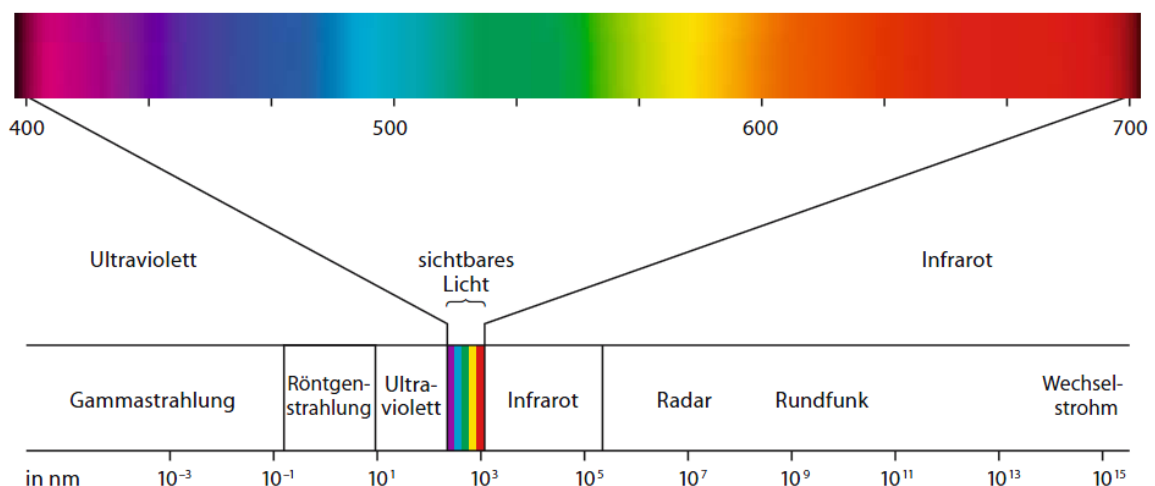


Abbildung 5 Spektrum des sichtbaren Lichtes (Stapelkamp, 2007)

Der Mensch kann psychophysisch rund 500 Helligkeitsstufen unterscheiden, unabhängig davon können 200 Farbtöne wahrgenommen werden (Eysel, 2006). Die Farbwahrnehmung kann Frequenzen zwischen etwa 760 nm (rot) und 380 nm (blau) unterscheiden (Stapelkamp, 2007). Für die Unterscheidung der Farben existieren im Auge drei unterschiedliche Zapfensysteme (Eysel, 2006).

Menschen, bei denen ein oder mehrere dieser Zapfensysteme fehlen, sind in der Farbwahrnehmung eingeschränkt, hier werden rotblinde (protanope), grünblinde (deutanope) und blauviolettblinde (tritanope) Menschen unterschieden (Eysel, 2006).



### 2.2.2.2 Adaption

Dem menschlichen Auge ist es möglich, auf große Leuchtdichteunterschiede zu reagieren. Als Leuchtdichte wird dabei der Helligkeitseindruck eines Beobachters bezogen auf eine definierte Fläche verstanden (Banda, 2002). Das Auge kann sich in einem Leuchtdichtebereich von etwa  $10^{-6}$  cd/m<sup>2</sup> bis etwa  $10^4$ - $10^5$  cd/m<sup>2</sup> relativ gut anpassen (Moshhammer & Kundi, 2013).

Der Adaptationsprozess läuft auf zwei Ebenen ab. Zum einen kann sich die Iris (Regenbogenhaut) wie eine Blende vor die Pupille schieben und damit den Lichteinfall erhöhen oder reduzieren. Die Reaktion auf einen plötzlichen Lichteinfall startet bei der Iris nach etwa 0,2-0,5 s und dauert je nach Größe des Helligkeitssprungs zwischen 0,5 s bis über 1 s (Klinke, Pape, Kurtz, & Silbernagl, 2010). Die zweite Ebene der Anpassung findet auf der Netzhaut statt. Hier passen sich Stäbchen und Zapfen an die unterschiedlichen Helligkeiten an. Dieser Prozess verläuft langsamer und kann bezogen auf die Zapfen bis zu 8 – 10 Minuten dauern (Dunkeladaptation auf Sehen in der Nacht) (Moshhammer & Kundi, 2013). Die Dunkeladaptation der Stäbchen kann bis zu einer Stunde dauern, soll aber hier nicht weiter betrachtet werden, da in den in dieser Arbeit betrachteten Situationen immer eine Restbeleuchtung von ca. 50 Lux vorliegt (BGI 5081).

Die Helladaptation läuft viel schneller ab. Zuerst schließt sich die Iris und die Umschaltung von Stäbchensehen zu Zapfensehen dauert ca. eine Minute (Moshhammer & Kundi, 2013).

Probleme ergeben sich, wenn im Bereich des Sichtfeldes eine zu hohe Leuchtdichte oder zu hohe Leuchtdichteunterschiede auftreten, die nicht zum aktuellen Adaptationszustand der Augen passen. Es wird dann von Blendung gesprochen. Dieser Zustand kann zu visuellen Störimpfindungen mit oder ohne nachweisbaren Minderungen von Sehfunktionen führen (DIN 5340).

### 2.2.2.3 Gesichtsfeld

Als Gesichtsfeld wird der Bereich bezeichnet, den ein normalsichtiger Mensch visuell wahrnehmen kann. Gemessen wird dieser bei still gehaltenem Körper und Kopf, die Augen fixieren dabei einen feststehenden Punkt. Bis zu den gerade noch wahrnehmbaren äußeren Grenzen erstreckt sich das Gesichtsfeld horizontal über 200° und vertikal 55° oberhalb des fixierten Punktes und 76° unterhalb (Schlick et al., 2010).

Abbildung 6 zeigt das zugelassene Gesichtsfeld für Gefahrensignale (DIN EN 842) und ist bei der Auslegung von Informations- und Warnsystemen von besonderer Bedeutung. Gerade die variable Sehachse hilft dabei, Signale innerhalb des Gesichtsfeldes geeignet zu positionieren.

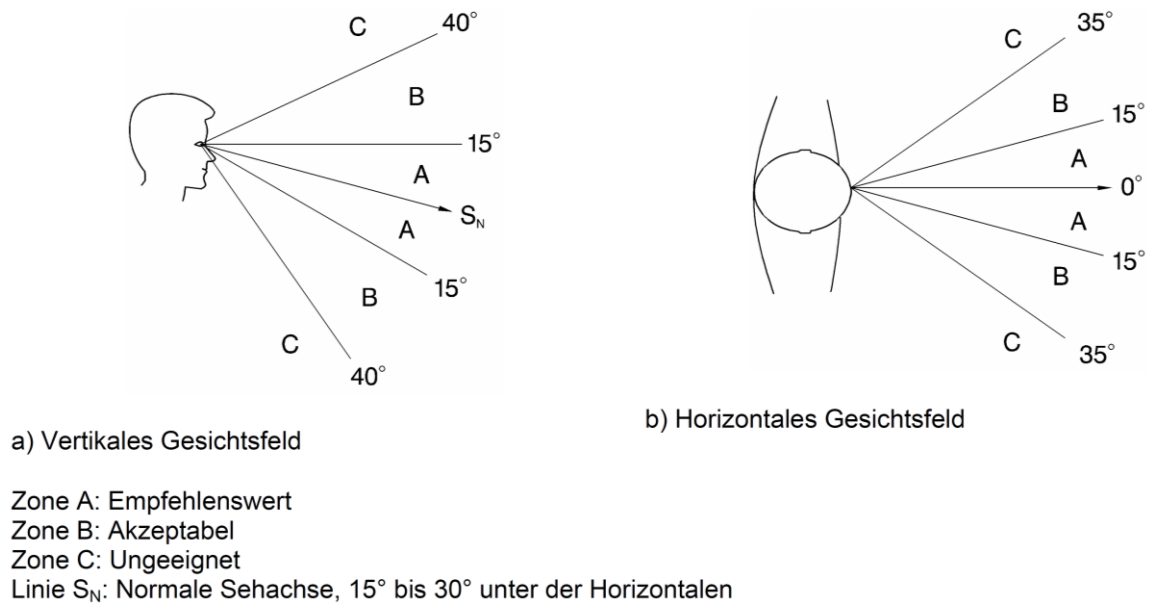


Abbildung 6 Gesichtsfeld, Sehachse nicht durch externe Arbeitsanforderungen vorgegeben (DIN EN 842)

### 2.2.3 Akustische Wahrnehmung

Über das Ohr nimmt der Mensch akustische Reize aus seiner Umgebung wahr. Den genauen Aufbau und die Funktionen erläutert Zenner (2006) in seinen Ausführungen über das Hören. Prinzipiell nimmt das Ohr Schallwellen über die Ohrmuschel auf und leitet diese zum Trommelfell weiter. Dieses überträgt die Schwingungen an die Gehörknöchelchen im Mittelohr, die wiederum die Cochlea des Innenohrs anregen. Hier werden die Schwingungen durch Sinneshärchen in der cochleären Trennwand erfasst und als interpretierbare Signale an das Gehirn weitergeleitet (siehe Abbildung 7). Bei diesem Übertragungsweg spricht man von Luftleitung.

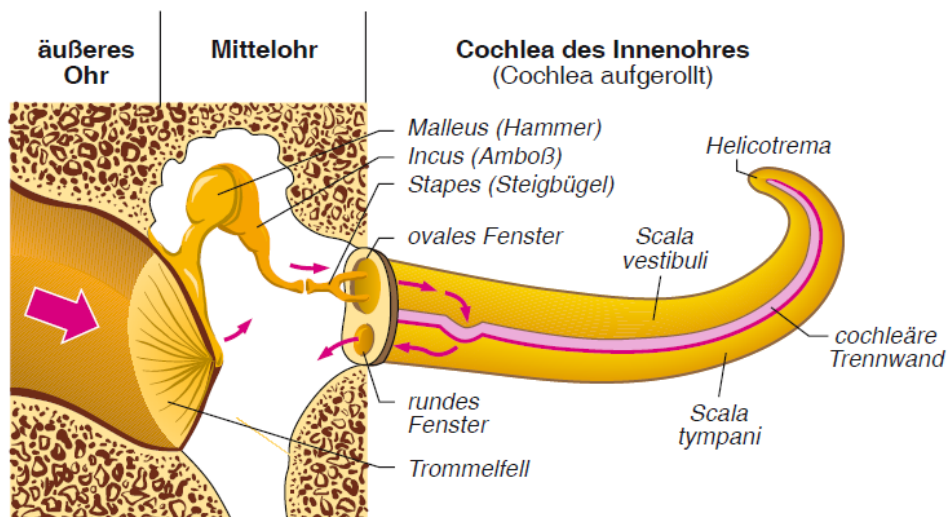


Abbildung 7 Aufbau des Ohres (Zenner, 2006)

Der Luftschall ist aber nicht der einzige Übertragungsweg für akustische Signale. Die Signalübertragung durch Bone Conduction (Knochenschallübertragung) stellt einen Vorgang dar,

bei welchem Signale durch Knochenschwingungen des Schädels direkt in das Innenohr übertragen werden. Dadurch werden die herkömmlichen Außen- und Mittelohrmechanismen umgangen. Im Innenohr benutzen Luftleitung und Bone Conduction den gleichen Umsetzungsmechanismus, um die akustischen Signale in Nervenimpulse umzuwandeln (Békésy, 1932; Békésy & Wever, 1989, c1960).

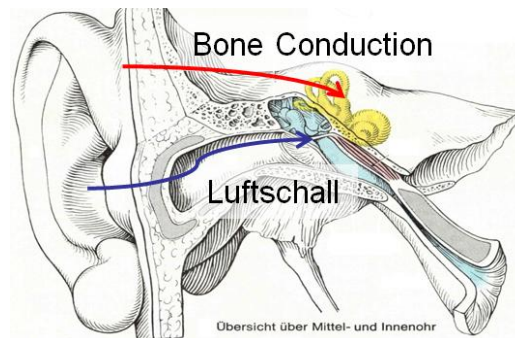


Abbildung 8 Übertragungswege Bone Conduction und Luftschall (Abb. nach Kahle & Frotscher, 2002)

In der Praxis erfolgt die vibrotaktile Anregung anhand kleiner Vibrationsgeber. Der Schall wird dabei punktuell auf den Schädelknochen übertragen und dann weitergeleitet. Wichtig ist es, auf die richtige Platzierung des Vibrationsgebers zu achten, nur so kann das übertragene Signal auch sicher wahrgenommen werden.

Laut McBride, Letowski und Tran (2005) ist der effektivste Standort für eine Platzierung der Vibrationskörper am Kondylus (B), gefolgt von dem Mastoid (G) und dem Vertex (K) (siehe Abbildung 9). Dabei genügt für die Anregung des Schädelknochens bereits ein leichter Druck für die Weitergabe der Signale.

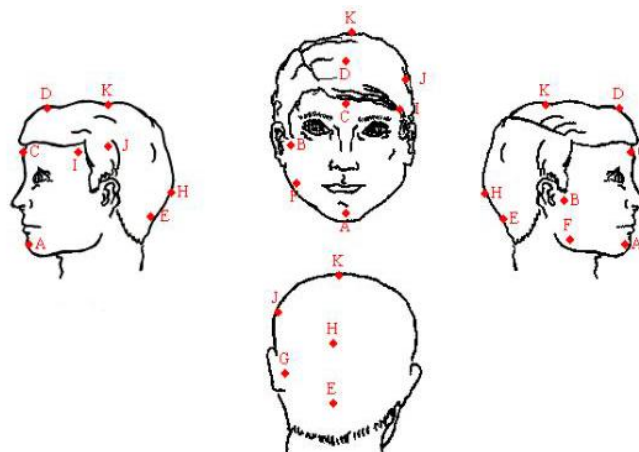


Abbildung 9 Positionierung des Vibrationsgebers (McBride et al., 2005)

Einer der wichtigsten Vorteile bei der Anwendung von Bone Conductionsystemen ist es, dass der Nutzer weiterhin, trotz verschlossener Ohren (z.B. durch Gehörschützer), die akustischen Signale wahrnehmen kann (Walker & Stanley, 2009).

Nach der Vorstellung beider Übertragungsarten soll noch etwas allgemeiner auf die akustische Wahrnehmung eingegangen werden. Laut Hellbrück und Ellermeier (2004) kann der Mensch Frequenzen zwischen 20 Hz und 20 kHz wahrnehmen. Allerdings wird nicht jede Frequenz als gleich laut empfunden. Abbildung 10 zeigt, dass besonders niedrige Frequenzen, aber auch Frequenzen oberhalb von 16 kHz, erst ab einem höheren Schalldruckpegel wahrgenommen werden können (Hellbrück & Ellermeier, 2004). Der Bereich der menschlichen Sprache von ca. 200 – 4000 Hz kann sehr gut wahrgenommen werden (Zenner, 2006).

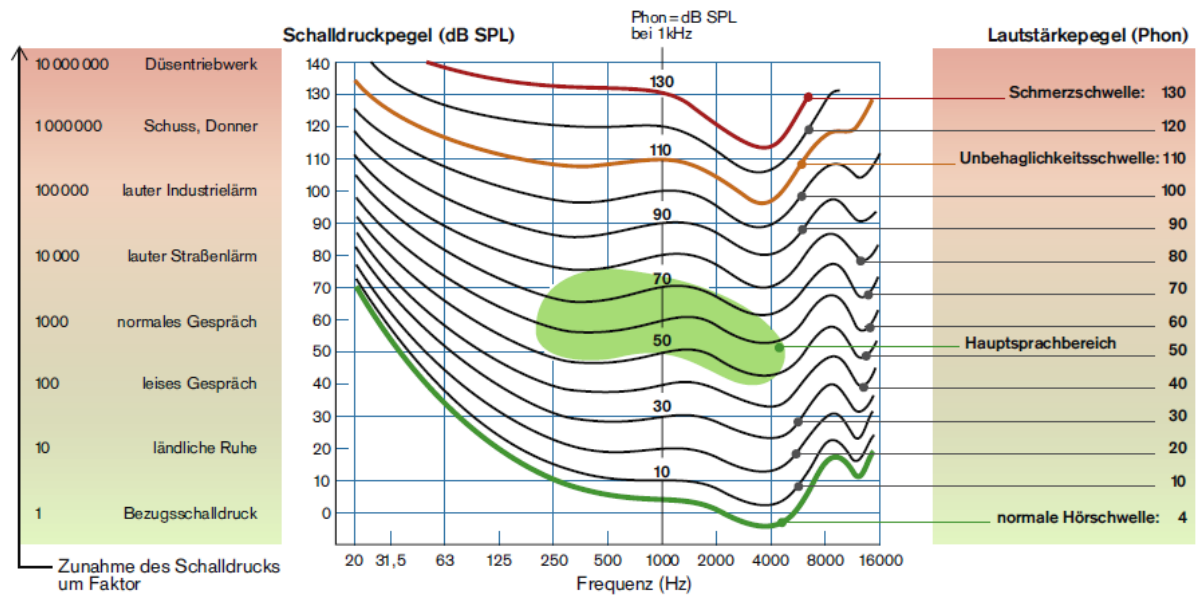


Abbildung 10 Isophone der menschlichen Wahrnehmung (Klinke et al., 2010)

Ebenfalls im Diagramm aufgetragen sind die normale Hörschwelle und die Schmerzgrenze als extreme Schwellen der Wahrnehmbarkeit. Da höhere Lärmpegel nicht nur unangenehm sind, sondern auch das Ohr irreparabel schädigen können, ist z.B. der Arbeitgeber verpflichtet, ab 85 dB Gehörschutz bereit zu stellen. Ab 90 dB muss dieser auch zwingend getragen werden (Malter & Guski, 2001).

Abbildung 11 zeigt die Hörschwellenverschiebung in Folge von Lärmschwerhörigkeit bzw. Altersschwerhörigkeit. Hier werden Frequenzen ab 2000 Hz nicht mehr so gut wahrgenommen.

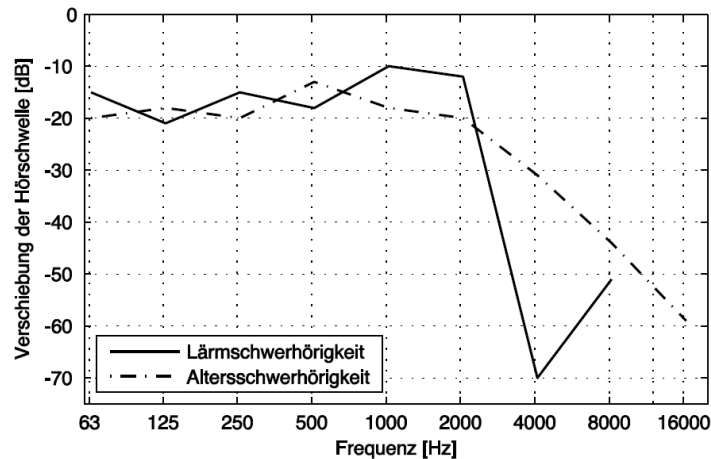


Abbildung 11 Hörschwellenverschiebung bei Lärmschwerhörigkeit und Altersschwerhörigkeit (Schlick et al., 2010)

Lärmschwerhörigkeit ist die Folge einer längeren Schalleinwirkung mit hoher Lautstärke. Meistens arbeiten dabei Personen über Jahre hinweg bei hohen Schallpegeln (z.B. Gleisbau) (Mayhorn & Podany, 2006). Es kommt zu einer bleibenden Verschiebung der Hörschwelle (engl.: Permanent Threshold Shift, PTS) (Hellbrück & Ellermeier, 2004). Altersschwerhörigkeit wird durch das Altern der Sinneshärchen im Innenohr ausgelöst, wobei es bei der Diagnose schwierig ist, Effekte einer evtl. Lärmschwerhörigkeit vom Altersprozess zu trennen (Hellbrück & Ellermeier, 2004).

Bei einem Vergleich zwischen Luftleitung und Bone Conduction werden Signale bei Bone Conduction-Systemen leiser wahrgenommen. Dies hängt mit der dämpfenden Wirkung des Schädels zusammen und kann einen Unterschied bis zu 60 dB ausmachen (Henry & Letowski, 2007). Auch die wahrnehmbaren Frequenzen sind im Falle der Bone Conduction nicht mehr so ausgeprägt wie bei der Luftleitung. Leider gehen hier die Ergebnisse der Forschung weit auseinander und daher sollte dieser Übertragungsweg in Zukunft noch genauer erforscht werden. Die beste Übertragung liegt bei Frequenzen um 1000 Hz (Henry & Letowski, 2007).

#### 2.2.4 Taktile Wahrnehmung

Unter taktiler Wahrnehmung werden Sinneseindrücke über die menschliche Haut verstanden. Innerhalb dieser Arbeit sollen zwei Schwerpunkte gesetzt werden, zum einen die Wahrnehmung mechanischer Schwingungen und zum anderen die thermische Wahrnehmung.

Die Wahrnehmung von mechanischen Schwingungen soll als die wohl verbreitetste Form der Interaktion zwischen Mensch und Maschine erläutert werden. Jedes Handy besitzt heutzutage eine taktile Rückmeldung über Vibrationen.

Darüber hinaus soll die thermische Wahrnehmung beschrieben werden. Sie ist im Zusammenhang der Mensch-Maschine-Interaktion eine nicht weit verbreitete Methode, birgt aber in besonderen Situationen interessante Lösungsansätze.

Beide Ansätze sollen dazu genutzt werden, einen dritten redundanten Sinneskanal bei der Gestaltung von Informations- bzw. Warnsystemen zu erschließen und damit multimodale Signale über mehr Sinneskanäle zu ermöglichen (Ferris & Sarter, 2008; van Erp, 2002; van Erp & Self, 2008; Wogalter, 2006b).

#### 2.2.4.1 Mechanische Schwingungen

Die Rezeptoren zur Wahrnehmung mechanischer Schwingungen (Vibrationen) befinden sich in der menschlichen Haut (Klinke et al., 2010). Klinke et al. (2010) stellt in Abbildung 14 anschaulich den Aufbau der Haut mit den einzelnen Rezeptoren dar.

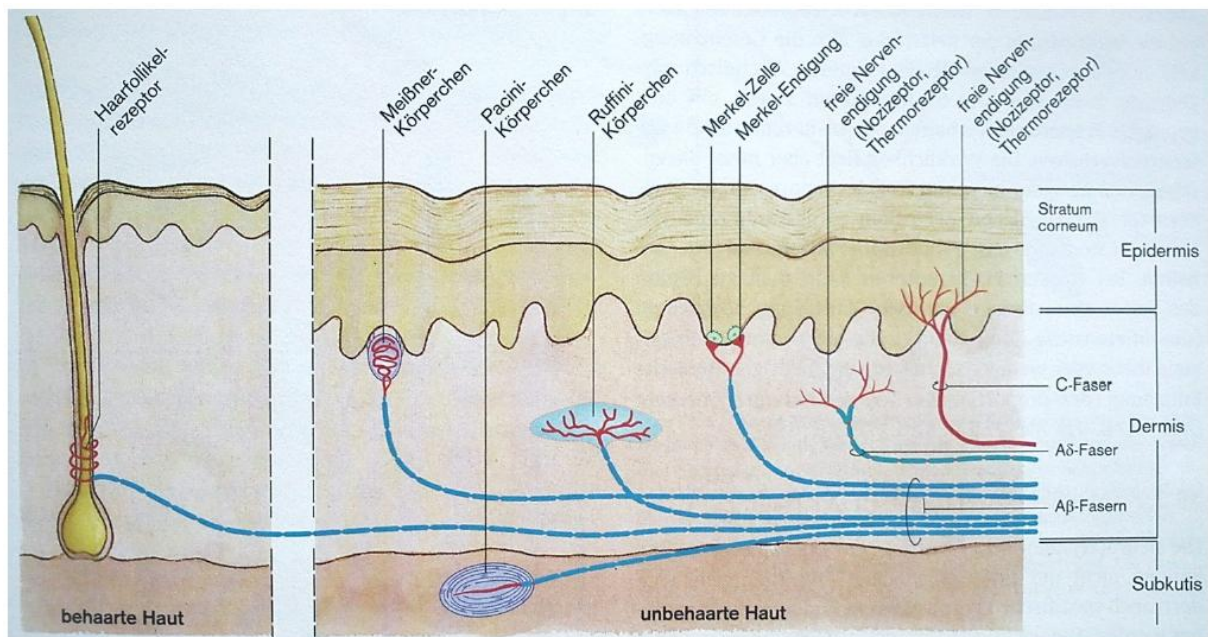


Abbildung 12 Aufbau der Haut mit Rezeptoren (Klinke et al., 2010)

Für die Wahrnehmung von Vibrationen sind insbesondere die Pacini-Körperchen zuständig, deren Wirkungsbereich zwischen 50 Hz und 400 Hz liegt (Handwerker, 2006; Klinke et al., 2010; Silbernagl & Despopoulos, 2012). In Tabelle 1 sind die Rezeptoren der Haut aufgelistet und die jeweiligen Besonderheiten beschrieben.



**Tabelle 1 Rezeptoren der Haut mit Beschreibung (Klinke et al., 2010)**

	Empfindungs- qualität	Sensorische Endigung (Lage in der Haut)	Adäquater Reiz	Rezeptor- bezeichnung
mechanische Sinne	Druck	Merkel-Endigung (Übergang Epidermis- Dermis)	Hautdeformation	SA I
	Spannung	Ruffini-Körperchen (Dermis)	Hautdehnung	SA II
	Berührung, Kitzelempfindung	Meißner-Körperchen (Dermis in unbehaarten Bereichen), Haarfollikelrezeptor (Dermis)	Hautberührung, Haarbewegung	RA
	Vibration	Meißner-Körperchen (Dermis in unbehaarten Bereichen)	Vibration (5-100 Hz)	RA
		Pacini-Körperchen (Subkutis)	Vibration (50-400 Hz)	PC
Temperatur- sinn	Kälte	freie Nervenendigung (Übergang Epidermis- Dermis)	Kälte (10-35 °C)	Kaltrezeptor
	Wärme	freie Nervenendigung (Dermis)	Wärme (30-45 °C)	Warmrezeptor

Die Anregung der Rezeptoren ist von vier Parametern abhängig: Frequenz, Amplitude, zeitliche Dauer der Anregung und Ort der Anregung (van Erp, 2002).

Die optimale Frequenz liegt dabei bei ca. 250 Hz für unbehaarte Haut (220 Hz für behaarte Haut) (van Erp, 2002; van Erp & Self, 2008). Nicht alle Körperteile sind gleich empfindlich gegenüber vibrierenden Signalen. Handflächen und Fußsohlen können sehr gut angeregt werden, der Kopfbereich hingegen ist weniger sensibel gegenüber mechanischen Schwingungen. Allgemein gilt, dass die Empfindlichkeit von äußeren zu den inneren Extremitäten abnimmt und je größer die Amplitude, desto besser die Wahrnehmung des Signals (Myles & Binseel, 2007; van Erp & Self, 2008).

Ein begrenzender Faktor ist die zeitliche Einwirkung, da es zu einer Adaption der Rezeptoren kommen kann. Dies führt zu einer Abnahme der Sensibilität gegenüber Reizen durch mechanische Schwingungen. Dieser Effekt tritt erst nach längerer Einwirkzeit (bis zu 25 Minuten) auf (van Erp, 2002). Er kann deshalb für ein auf kurze Dauer beschränktes Warnsignal vernachlässigt werden.

Zur Übermittlung von taktilen Signalen im Bereich der Fingerspitzen liefert die Dissertation von Röbig (2015) bereits umfassende Erkenntnisse. Diese werden bei der späteren Gestaltung der Signale miteinbezogen.

#### **2.2.4.2 Thermische Wahrnehmung**

Die thermische Wahrnehmung des Menschen erfolgt über Kälte- und Wärmerezeptoren innerhalb der Haut. Anschaulich dargestellt findet man auch diese in Abbildung 12 (Klinke et

al., 2010). In welchen Bereichen die beiden Rezeptoren Temperaturen wahrnehmen können, ist in Tabelle 1 (Klinke et al., 2010) zu finden.

Nach Klinke et al. (2010) besitzt der Mensch über den Körper verteilt mehr Kalt- als Warmrezeptoren. Von Campenhausen (1981a) liefert hierzu eine genauere Aufstellung der Kalt- bzw. Warmrezeptoren über die einzelnen Bereiche des menschlichen Körpers. Besonders an den Armen ist die Empfindlichkeit gegenüber Kälte sehr ausgeprägt. Weniger empfindlich verhält sich hingegen der Brustbereich (von Campenhausen, 1981b).

Großen Einfluss auf die Wahrnehmung hat die Fläche, auf die der thermische Reiz wirkt (von Campenhausen, 1981a). Somit wird ein Maximum der Wahrnehmung bei der Reizung des gesamten Körpers erreicht (von Campenhausen, 1981b).

Adaptionseffekte sind ebenfalls sehr ausgeprägt. Während die Rezeptoren bei einer Temperaturänderung noch rege anschlagen, kommen nach kurzer Zeit nur noch wenige Reize im Gehirn an. Die Temperatur wird weniger extrem wahrgenommen (Klinke et al., 2010).

Grenzen der thermischen Wahrnehmung sind erreicht, wenn die Wärme- bzw. Kälteempfindung in eine Schmerzempfindung übergeht. Bei Temperaturen unter 20°C und über 42°C beginnt diese Schmerzgrenze (Schmidt & Schaible, 2006).

## 2.3 Analyse von Informations- bzw. Warnsystemen

Dieses Kapitel soll Informations- bzw. Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten grundlegend analysieren. Überall wo Menschen während ihrer Arbeit Gefahren ausgesetzt sind, müssen Vorkehrungen zu ihrem Schutz getroffen werden. DIN EN ISO 12100 enthält zu diesem Zweck einen Prozess zur Risikominderung aus Sicht des Konstrukteurs (vgl. Abbildung 13).



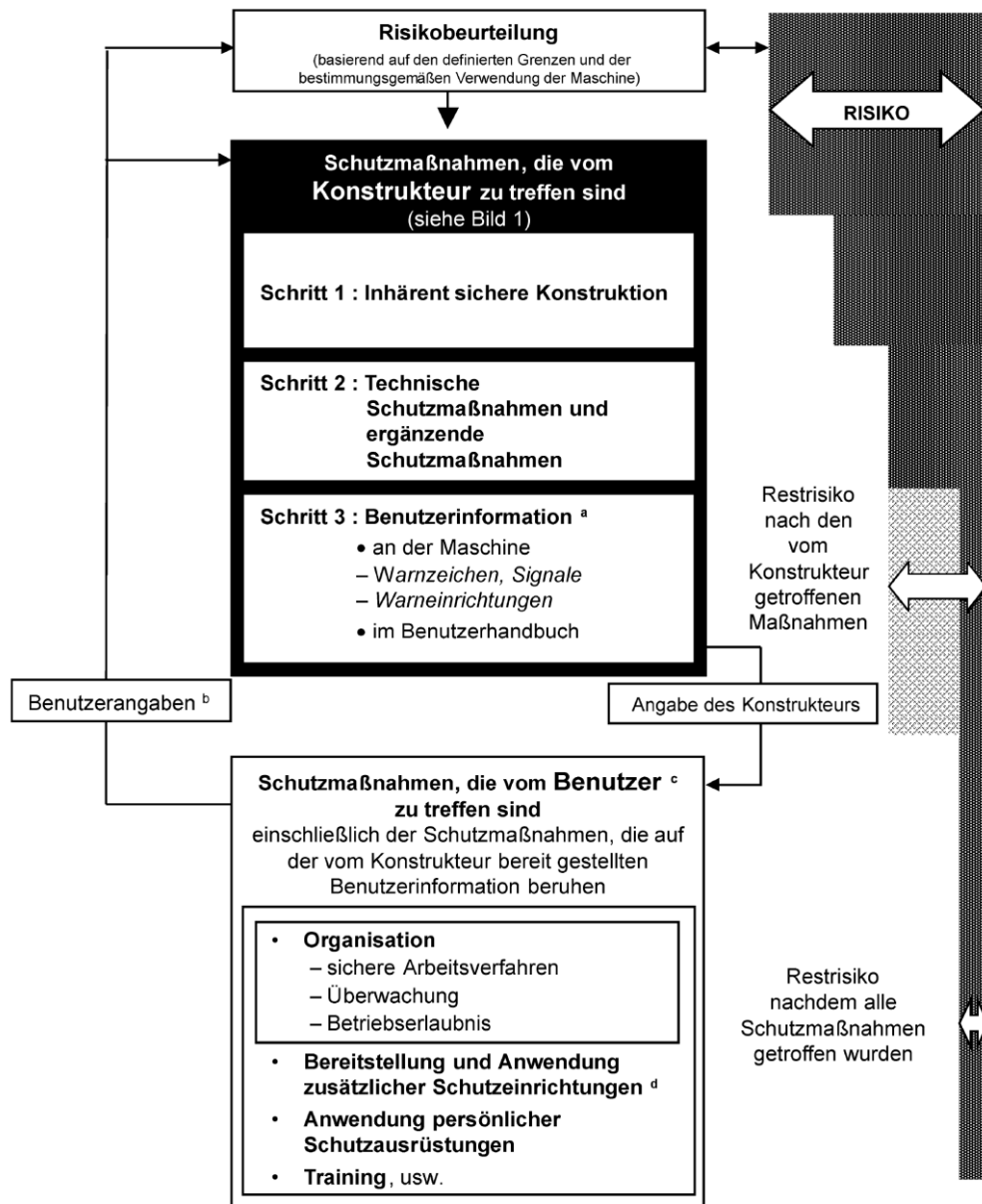


Abbildung 13 Prozess zur Risikominderung aus Sicht des Konstrukteurs (DIN EN ISO 12100)

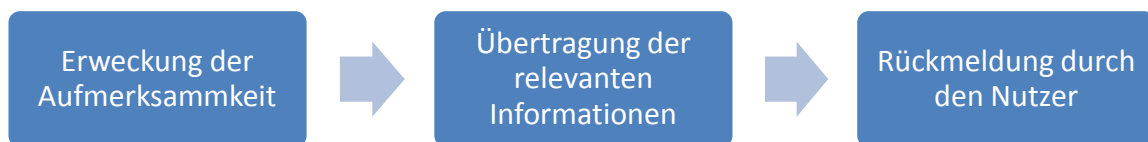
In der Praxis ist es nicht immer in allen Situationen möglich, eine Gefahr auszuschließen oder den Menschen sicher räumlich bzw. zeitlich davon zu trennen. In diesem Fall kommt es zum Einsatz von Informations- bzw. Warnsystemen (in Abbildung 13 verdeutlicht durch Schritt 3 „Benutzerinformation“ (DIN EN ISO 12100)). Dieses Vorgehen bildet auch in abgewandelter Form die Rangreihenfolge nach RIMINI (DGUV Information 201-021) ab, die im Gleisbau eingesetzt wird.

Eine Schwierigkeit bei der Gestaltung von Informations- und Warnsystemen stellt der Zeitpunkt dar, an dem der Nutzer eine Information bzw. eine Warnung erhalten soll. Bei der Kollisionswarnung im Automobilbereich wird in diesem Zusammenhang von einem Warndilemma gesprochen (Hoffmann & Gayko, 2012). Erhält ein Fahrer die Warnung vor einer drohen-

den Kollision zu einem frühen Zeitpunkt, kann es sein, dass das über Sensoren aufgenommene Umgebungsbild des Fahrzeuges noch eine Vielzahl zukünftiger Szenarien zulässt. Die Chance eines falschen Alarms ist deshalb recht hoch. Wird die Warnung zu einem späteren Zeitpunkt gegeben, kann zwar eine genauere Aussage der Technik über die gegenwärtige Situation getroffen werden, doch ob die Zeit dann noch ausreicht, damit der Fahrer angemessen reagieren kann, bleibt offen.

Dieses Dilemma kann beliebig auf andere Bereiche übertragen werden, in denen es zum Einsatz von Warnsystemen kommt. So könnte beispielsweise der Gleisarbeiter bei einer zu frühen Warnung in Versuchung geraten, eine Tätigkeit aus Gründen des Termindrucks trotz Warnung beenden zu wollen. Dies könnte dann in einer gefährlichen Situation im Zusammenhang mit einem nahenden Zug resultieren. Es stellt sich also die Frage, wann eine Information bzw. Warnung am geeignetsten an eine Zielperson oder Zielgruppe abgegeben werden sollte.

Um auf diese Fragestellung einzugehen, soll der Ablauf einer Informations- bzw. Warnübertragung grundlegend in drei Ablaufschritte unterteilt werden (siehe Abbildung 14). Dies geschieht in Anlehnung an das AKC Modell nach (Laughery & Wogalter, 2014) (siehe Kapitel 2.2.1).



**Abbildung 14** Prinzipieller Ablauf einer Informations- bzw. Warnübertragung (Laughery & Wogalter, 2014)

Die Erweckung der Aufmerksamkeit stellt dabei den ersten und wichtigsten Schritt dar. Im Normalfall ist der Nutzer eines solchen Systems damit beschäftigt, seiner Arbeitsaufgabe nachzukommen. Je nachdem, wie hoch der Anteil der für die Aufgabe benötigten Aufmerksamkeitsressourcen ist, werden vom Informations- bzw. Warnsystem entsprechend dargebotene Informationen wahrgenommen oder nicht. Aus diesem Grund ist es wichtig, in dieser Phase der Informations- bzw. Warnübertragung die Signale optimal wahrnehmbar darzustellen. Je nach gewähltem Sinneskanal liegen geeignete Signale deshalb beispielsweise für die visuelle Wahrnehmung im Bereich des Sichtfeldes, im akustischen Bereich bei gut wahrnehmbaren Frequenzen und für taktile Signale an Stellen, die besonders sensibel für mechanische Schwingungen sind. Darüber hinaus muss beim Einsatz mehrerer Signale unterschiedlicher Bedeutung auf eine gute Unterscheidbarkeit geachtet werden (VDI/VDE 3850 Blatt 1).

Bei der Übertragung der relevanten Informationen liegt die Aufmerksamkeit bereits auf dem Informations- bzw. Warnsystem. Hier entscheidet der Nutzungskontext des Systems über die Tiefe der zu übertragenden Informationen. Zum Beispiel sollten Internetnutzer, die auf eine Gefahr hingewiesen werden, nicht nur eine reine Problembeschreibung erhalten, sondern auch über Handlungsalternativen informiert werden. Icons können dabei eine wichtige Ergänzung sein (Dewar, 2006). Gerade bei Anwendungen im mehrsprachigen Raum können Icons über die Sprachbarriere hinweghelfen (Dewar, 2006). Am Ende der Informationsübertragung sollten dem Nutzer seine Handlungsalternativen bewusst sein, so dass er im Folgenden die richtigen Handlungen ausführt.

Im letzten Schritt erfolgt zu der vermeintlich richtigen Handlung zusätzlich eine Rückmeldung des Nutzers an das Informations- bzw. Warnsystem. Dies ermöglicht eine systemseitige Bewertung des Vorgangs und gibt dem System die Möglichkeit, angemessen zu reagieren. Gibt der Nutzer eine richtige, d.h. zu der Warnung bzw. Information passende Rückmeldung, kann das System davon ausgehen, dass auch die richtige Handlung erfolgen wird. Damit können alle Signale gestoppt werden, der Vorgang wurde erfolgreich beendet. Stimmt die Rückmeldung nicht mit der erwarteten Meldung überein, hat das System zu entscheiden, welche weiteren Schritte getroffen werden müssen (z.B. Verschärfung der Informations- bzw. Warnsignale oder Alarmierung eines Sicherheitsbeauftragten).

Diese drei Schritte sollen als Orientierung während der Gestaltung der in dieser Arbeit beschriebenen Warnsystemkomponenten verwendet werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Signalübertragung von Informations- bzw. Warnsystemen ist die Tatsache, dass selbst bei der optimalen Gestaltung eines Signals für einen spezifischen Sinneskanal nie alle Umgebungseinflüsse abgedeckt werden können. Shannon and Weaver (1964) beschrieben z.B. in ihrem „Nachrichtentechnischen Modell der Kommunikation“ die Störung einer Nachrichtenübertragung durch Lärm. Aus diesem Grund ist es gerade in gefährlichen Situationen notwendig, Signale redundant über mehrere Sinneskanäle des Menschen zu übertragen (Feldhusen & Grote, 2013; Wogalter, 2006b). Dieser Punkt wird heutzutage bereits von vielen Systemen berücksichtigt. Ein Handy beispielsweise, als gängiger Vertreter der Informationssysteme, verfügt in den meisten Fällen über ein akustisches Signal, das durch ein taktilen Signal (Vibrationsalarm) ergänzt werden kann. Darüber hinaus können die meisten Handys, z.B. in Besprechungen, Anrufe durch Meldungen auf dem Display oder das Blinken einer LED signalisieren.

In den nun folgenden Kapiteln werden zuerst wichtige Gestaltungsfaktoren eingeführt (vgl. Kapitel 2.3.1), anschließend erfolgt eine sinnvolle Einteilung von Informations- bzw. Warnsystemen (vgl. Kapitel 2.3.2) und am Ende des Kapitels werden grundsätzliche Warnstrategien vorgestellt (vgl. Kapitel 2.3.3).

### **2.3.1 Einführung wichtiger Gestaltungsfaktoren**

Wie bereits im vorherigen Kapitel angesprochen, sollten Informations- bzw. Warnsysteme die Dringlichkeit der aktuellen Situation widerspiegeln. Sie sollen gut wahrnehmbar sein und die Signale müssen klar voneinander unterschieden werden können. Diese drei Punkte sollen in den folgenden Unterkapiteln kurz erläutert werden.

#### **2.3.1.1 Wahrnehmbarkeit**

Die Wahrnehmbarkeit hängt von der Gestaltung der eingesetzten Signale ab. Jede Modalität besitzt dabei ihre eigenen Parameter (z.B. Frequenzen der Signale, Position am menschlichen Körper), die dafür Sorge tragen, eine optimale Wahrnehmbarkeit zu gewährleisten (Wogalter, 2006a).

Zusätzlich hängt die Wahrnehmbarkeit von den vorliegenden Umgebungsbedingungen ab, die es im Extremfall verhindern können, ein bestimmtes Signal wahrzunehmen. Multimodale Signalgestaltung tritt dem entgegen und erhöht damit die Wahrnehmbarkeit (Wogalter, 2006b; Wogalter & Vigilante, 2006).

Der dritte Faktor ist der Mensch selbst, bei dem die Wahrnehmung eingeschränkt oder verhindert sein kann (z.B. Farbfehlsichtigkeiten oder Probleme bei der akustischen Wahrnehmung) (Mayhorn & Podany, 2006). Hier können die Signale so gestaltet werden, dass sie trotzdem noch von anderen Signalen unterschieden werden können (z.B. durch eine Positionskodierung wie im Fall einer Ampel). Ansonsten kann auch hier durch eine multimodale Ausprägung der Signale Abhilfe geschaffen werden.

#### **2.3.1.2 Unterscheidbarkeit**

Die Unterscheidbarkeit ist immer dann ein wichtiger Faktor, wenn es mehrere Signale mit unterschiedlichen Bedeutungen gibt (VDI/VDE 3850 Blatt 1). Je nach Modalität kann die Unterscheidbarkeit durch verschiedene Parameter beeinflusst werden. Für die visuelle Darstellung können Signale in unterschiedlichen Farben, anderen Formen oder an verschiedenen Positionen im Gesichtsfeld gestaltet werden (DIN EN 842).

Bei der Gestaltung der Signale sind auch Personen mit Einschränkungen in der Wahrnehmung zu berücksichtigen. So können z.B. Farbfehlsichtigkeiten durch die Auswahl von trotzdem noch unterscheidbaren Farbtönen berücksichtigt werden (Mayhorn & Podany, 2006).

Durch den Einsatz von multimodalen Systemen entsteht, bezogen auf die Unterscheidbarkeit, eine zusätzliche Redundanz. Wobei eine endgültige Sicherheit, ob eine Person ein Signal klar von anderen Signalen unterschieden hat, nur über eine Kontrollfunktion bzw. eine Form der Nutzerrückmeldung sichergestellt werden kann.

### **2.3.1.3 Dringlichkeit**

Sind nur die Größe oder Tragweite einer Gefahr bekannt, reicht es nicht, allein darauf basierend Informations- bzw. Warnmeldungen zu gestalten. Die Dringlichkeit ist als weitere Einflussgröße miteinzubeziehen.

„Der Begriff „Dringlichkeit“ bezeichnet den Grad der Akutheit einer Gefahr bzw. die Unmittelbarkeit, mit der Gegenmaßnahmen ergriffen werden müssen, um die Gefahr auszuschließen“ (Malter & Guski, 2001).

Im Zuge eines Informations- bzw. Warnprozesses müssen noch die Begriffe „wahrgenommene Dringlichkeit“ und „situative Dringlichkeit“ unterschieden werden.

Die wahrgenommene Dringlichkeit bezeichnet die von der betreffenden Person empfundene Akutheit der Information bzw. Warnung. Sie ist situationsunabhängig und hängt rein von den Parametern des dargebotenen Signals (z.B. Anzahl der genutzten Warnsignalgeber oder bezogen auf die Modalität, Frequenz eines akustischen Signals) ab (Malter & Guski, 2001).

Die situative Dringlichkeit beschreibt die von der betreffenden Person in einer bestimmten Situation empfundene Dringlichkeit aufgrund einer Warnmeldung. Hier spielen Lerneffekte und die eigene Erfahrung mit Informations- bzw. Warnmeldungen eine wichtige Rolle. Wahrgenommene und situative Dringlichkeit können in der Praxis weit auseinander liegen (Malter & Guski, 2001).

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll nur die wahrgenommene Dringlichkeit betrachtet werden, da diese situationsunabhängig ist und so bei Versuchen abseits des realen Feldes trotzdem bewertet werden kann.

### **2.3.2 Einteilung von Informations- bzw. Warnsystemen**

Informations- und Warnsysteme lassen sich auf viele verschiedene Arten unterteilen. Einfach wäre die Einteilung nach dem Einsatzgebiet der jeweiligen Systeme, allerdings würde sich

daraus keine für diese Arbeit sinnvolle Systematik ergeben, da es zu viele mögliche Einsatzgebiete gibt. Wichtiger hingegen ist die Einteilung nach automatischen- und nicht automatischen Informations- und Warnsystemen, da hier der Faktor Mensch, als Auslöser manueller Systeme, einen zusätzlichen Parameter darstellt.

Nicht automatische Informations- und Warnsysteme müssen per Handeinschalter manuell durch das Bedienpersonal ausgelöst werden. Sie kommen meist an Baustellen zur Anwendung, an denen der Einsatz von automatischen Systemen zu teuer ist. Im Bereich des Gleisbaus wird dies z.B. durch Sicherheitsunternehmen übernommen (DGUV Vorschrift 23; DGUV Regel 101-024). Diese Klasse der nicht automatisierten Systeme soll in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden. Das Einsatzgebiet dieser Systeme liegt meist bei sehr kleinen Baustellen und diese könnten zukünftig sicherer über die, innerhalb der Arbeit dargestellten, individuellen Warnsysteme abgedeckt werden.

Bei automatisierten Informations- und Warnsystemen werden die Signale automatisch durch das System an die betreffenden Personen übermittelt. Dabei wird das auslösende Ereignis über Sensoren erkannt und bewertet. Je nach Dringlichkeit der Situation wird dann ein entsprechendes Signal ausgegeben.

Für die Ausgabe der Information oder Warnung werden innerhalb dieser Arbeit zwei verschiedene Wege unterschieden. Entweder jede Person besitzt ein eigenes Informations- bzw. Warnsystem (individuelles System), oder eine ganze Gruppe wird kollektiv durch ein System informiert bzw. gewarnt.

In den nächsten zwei Unterkapiteln wird näher auf diese Thematik eingegangen und die wesentlichen Unterschiede zwischen kollektiven und individuellen Warnsystemen herausgearbeitet.

### **2.3.2.1 Kollektive Systeme**

Kollektive Informations- und Warnsysteme sind dafür ausgelegt, Gruppen von mehreren Personen zu erreichen. Dabei werden die Signale zentral oder über mehrere Stationen an die betroffenen Personen verteilt. Die einzelne Person trägt dabei keinen Signalgeber des Informations- und Warnsystems bei sich. Kollektive Systeme müssen so aufgestellt werden, dass jede betroffene Person die Signale sicher wahrnehmen kann (Satow & Bernard, 2007; Wogalter, 2006b). Häufig wird dabei mit redundanten Signalen gearbeitet (Feldhusen & Grote, 2013; Wogalter, 2006b). Ein akustischer Warnton kann beispielsweise durch eine visuelle Blitz-

leuchte ergänzt werden, so dass je nach Umgebungsbedingungen mindestens ein Signal wahrgenommen werden kann.

Jede betroffene Person erhält dabei das gleiche Signal, unabhängig davon, in welcher individuellen Situation sie sich zu dem Zeitpunkt befindet. So muss beispielsweise dafür Sorge getragen werden, dass im Falle eines Feuersalarms den Personen in einem Gebäude die richtige Reaktion auf ein solches Signal bewusst ist. Es gibt keine Möglichkeit der Rückmeldung eines Einzelnen, das kollektive Informations- und Warnsystem erhält keinen Input, ob die Personen erfolgreich gewarnt bzw. informiert wurden. Aus unter anderem diesem Grund setzen Gleisbauunternehmen z.B. Sicherungsposten ein (DGUV Vorschrift 78), um im Falle der Nichtbeachtung einer Warnung die betreffende Person schnell in Sicherheit bringen zu können.

Der Vorteil von kollektiven Informations- bzw. Warnsystemen liegt bei der sehr guten Erreichbarkeit der zu informierenden bzw. zu warnenden Personen. Auch Personen, die z.B. neu auf einer durch ein Warnsystem abgesicherten Baustelle ankommen, sind sofort durch das System abgedeckt.

Nachteilig wirkt sich die überall zu gewährleistende Wahrnehmbarkeit eines Informations- bzw. Warnsystem aus. Gerade die Einwirkung von auftretenden Arbeitsmaschinen bewirkt, dass das Informations- bzw. Warnsystem eine erhebliche Lautstärke (bis zu 126 dB(A)) aufweisen muss (DGUV Information 201-021). Auch bei der redundanten Verwendung von Blitzlichtern ist es bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen schwierig, eine problemlose Interaktion mit solchen Systemen zu garantieren. Hier bleibt eigentlich nur der Einsatz von zusätzlichem Sicherungspersonal, das gesetzten Falles eingreifen kann, um einen problemlosen Einsatz sicherzustellen (DGUV Vorschrift 78).

### **2.3.2.2 Individuelle Systeme**

Bei individuellen Informations- und Warnsystemen trägt jede Person einen eigenen Signalgeber mit sich. Auch hier existiert ein sensorisches System, das Ereignisse oder Gefährdungen aufnehmen kann, um diese zur Weiterverarbeitung an das Informations- bzw. Warnsystem zu übertragen.

Es existieren zwei Ausprägungsformen von individuellen Informations- und Warnsystemen (Pöhlker, 2012; Swissphone Telecommunications GmbH, 2014). Die eine lehnt sich grundsätzlich an die Funktionalität der kollektiven Informations- und Warnsysteme an. Auch hier erhalten die betreffenden Personen alle das gleiche Signal und müssen dann eine entsprechen-

de Handlung ausführen. Hier kann die Ausprägungsform des jeweiligen Signals besser an die vorliegenden Umgebungsbedingungen angepasst werden (Swissphone Telecommunications GmbH, 2013; ZÖLLNER GmbH, 2004).

Bei der zweiten Form von Systemen besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Signale an die Träger der Signalgeber zu schicken. Dadurch ist es möglich, individuell auf die jeweilige Situation der einzelnen Person einzugehen (Pöhlker, 2012; Swissphone Telecommunications GmbH, 2014).

Eine moderne Variante eines individuellen Informations- bzw. Warnsystems kann zusätzlich noch mit einer Rückmeldefunktion ausgestattet sein (Pöhlker, 2012; Swissphone Telecommunications GmbH, 2014). Dadurch wird gewährleistet, dass die betreffende Person auch die jeweilige Information bzw. Warnung richtig verstanden hat. So kann entweder das Signal beendet werden, oder bei einem nicht richtig verstandenen Signal ein weiteres, angepasstes Signal ausgesendet werden.

Ein Anwendungsbeispiel solch eines individuellen Alarmierungssystems findet sich bei der Feuerwehr. Hier gehen in der Brandmeldezentrale Meldungen über Notfälle im Einsatzfeld der Feuerwehr ein. Die Einsatzkräfte tragen mobile Alarmierungsgeräte mit sich und werden durch die Brandmeldezentrale über ein akustisches Signal informiert. Ist die Einsatzkraft verfügbar, kann sie die Meldung bestätigen und weitere Informationen abrufen. Zusätzlich kann die Einsatzkraft mit der Einsatzzentrale über vorformulierte Kurznachrichten kommunizieren (Lagercrantz Group AB, 2015).

Vorteil der individuellen Informations- bzw. Warnsysteme ist die Bindung des Gerätes an die betreffende Person. Dadurch können die Signale an die jeweilige Situation angepasst werden. Außerdem entsteht durch diese Form der Signalübertragung kein allgemeiner Lärm, wie dies z.B. bei einem Feuersalarm der Fall wäre. Zusätzlich bietet eine Rückmeldungsfunktion eine Sicherheit, dass die betreffende Information oder Warnung richtig verstanden wurde.

Ein großer Nachteil besteht darin, dass nur Personen mit mobilen Signalgebern Meldungen erhalten können. In gefährlichen Bereichen muss das Gebiet genauestens kontrolliert werden, damit keine fremden Personen ohne Signalgeber Zutritt erlangen (Eisenbahn-Unfallkasse, 2005). Zusätzlich müssen die Signalgeber so gestaltet sein, dass sie auch unter Einsatz von persönlicher Schutzausrüstung getragen und wahrgenommen werden können.



### 2.3.3 Grundsätzliche Informations- bzw. Warnstrategien

Das folgende Kapitel soll die grundsätzlichen Strategien bei der Gestaltung von Informations- und Warnsignalen aufzeigen. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, muss, bevor die eigentliche Informations- bzw. Warnübertragung möglich ist, zuerst die Aufmerksamkeit der jeweiligen Person erregt werden. Dies geschieht über die Warnsignalgeber, die Signale möglichst multi-modal an den Menschen übertragen (Wogalter, 2006b). Ziel ist es in diesem Zusammenhang, eine möglichst sichere Signalübertragung zu gewährleisten.

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Wahl einer geeigneten Strategie ist die Akzeptanz des Informations- bzw. Warnsystems bei den jeweiligen Nutzern. Neben einer sicheren Signalübertragung sind hier die Verlässlichkeit des Systems und die Belastung durch das System von Bedeutung (Wogalter, 2006b).

Die Verlässlichkeit ist abhängig von den technischen Komponenten, die sich durch eine besondere Ausfallsicherheit („fail-safe-Prinzip“) (Eisenbahn-Unfallkasse, 2005; Feldhusen & Grote, 2013) auszeichnen müssen. Außerdem ist es nach Wogalter (2006) von großer Wichtigkeit, das Auftreten von Fehlalarmen möglichst auszuschließen (Van Cott & Kinkade, 1972). Da innerhalb dieser Arbeit mehr Augenmerk auf die Gestaltung der Prototypen, Signale und Abläufe gelegt wurde, soll die technische Umsetzung eines ausfallsicheren Systems hier nicht behandelt werden. Auch die eingehenden Signale zum Auslösen einer Information bzw. einer Warnung sollen innerhalb dieses Forschungsvorhabens ausschließlich simuliert werden, deshalb sind in diesem Zusammenhang keine Fehlalarme möglich und wurden auch nicht weiter betrachtet.

Ein weiterer Punkt, der entscheidend dafür ist, ob eine gewählte Informations- bzw. Warnstrategie zum Tragen kommt, ist die Belastung, die über ein Informations- bzw. Warnsystem auf den jeweiligen Nutzer ausgeübt wird. In erster Linie soll der Nutzer eines Informations- bzw. Warnsystems die individuelle Beschäftigung oder Arbeitsaufgabe ausführen können, ohne stärker als nötig durch das System beeinträchtigt zu werden (DIN EN ISO 9241-110; Van Cott & Kinkade, 1972). Das System sollte den Nutzer bei seiner Arbeit also nicht stören, die Informationen aber im Ernstfall angepasst kommunizieren. Ein gutes Beispiel aus einem anderen Kontext stellt ein Fahrzeugführer dar, der vergessen hat den Anschnallgurt anzulegen. Verfügt das Fahrzeug über ein Kontrollsystem des Gurtes bekommt der Fahrer nach dem Losfahren ein akustisches Signal, das meist durch eine Anzeige ergänzt wird. Nun kann er entweder auf die Warnung reagieren und den Gurt anlegen, oder das akustische Signal wird nach kurzer Zeit dringlicher bis hin zu einem „nervenden“ Dauerton im Extremfall. Beim Fahr-

zeugführer wird das Kontrollsystem also beim angeschnallten Fahren überhaupt nicht bemerkt, schnallt er sich aber nicht an, wird das System aktiv und steigert in vordefinierten Intervallen seine Intensität, bis eine Reaktion erfolgt. Ähnliches passiert mit einem Wecker, der nicht abgeschaltet wird und mit immer lauterem bzw. extremeren Tönen versucht, seinen Besitzer zu wecken.

In beiden Beispielen versucht das Informations- bzw. Warnsystem zuerst etwas zurückhaltender, später aber stetig stärker, die Aufmerksamkeit und die geforderte Reaktion durch den Nutzer zu bekommen. Im Bereich des Gleisbaus werden die Arbeiter über ihre ganze Arbeitsschicht von einem Warnsystem begleitet und müssen im Extremfall alle fünf Minuten auf eine Warnung reagieren (Walter, 2007). Hier ist es besonders wichtig, dass die Belastung durch das Informations- bzw. Warnsystem nicht zu einer starken Beanspruchung des Arbeiters führt.

Um diesem Problem zu begegnen, können zwei verschiedene Strategien angewendet werden. Zum einen die simultane Strategie (siehe Kapitel 2.3.3.1), bei der die Signale aller geeigneten Warnsignalgeber gleichzeitig wirken, und zum anderen die kaskadierte Strategie (siehe Kapitel 2.3.3.2), bei der die Signale je nach Dringlichkeit der Situation sukzessive gesteigert werden. Beide Strategien werden in den folgenden zwei Kapiteln näher beleuchtet.

### **2.3.3.1 Simultane Strategie**

Die simultane Strategie beschreibt ein Vorgehen, bei dem alle Signalgeber gleichzeitig aktiviert werden. Das heißt das Informations- bzw. Warnsystem bewertet zuerst die Dringlichkeit der Situation und sendet anschließend über die Signalgeber ein Informations- bzw. Warnsignal. Dieses Signal kann auch an unterschiedliche Sinnesorgane des Menschen gerichtet sein. Das Signal wird so lange übermittelt, bis das Ereignis vorüber ist oder es manuell (z.B. durch Rückmeldung des Empfängers) quittiert wurde. Die Auswahl der geeigneten Signalgeber geschieht bei der Gestaltung der Signale und kann während der Informations- bzw. Warnübermittlung nicht verändert werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, die Signale an alle möglichen Umgebungsbedingungen anzupassen, damit es nicht z.B. zu einem Überhören eines Signals kommt (DIN EN 61310-1; DIN EN 981).

Ändert sich die Dringlichkeit der Situation, muss das Signal beendet werden oder ist durch ein der Situation angepasstes Signal zu ersetzen (DIN EN ISO 9241-110). Eine adaptive Anpassung an die Umgebungsbedingungen ist jedoch möglich. So kann z.B. bei heller Sonneneinstrahlung die Helligkeit eines visuellen Signals nach oben korrigiert oder bei Lärm die Lautstärke eines akustischen Signals erhöht werden.

Im praktischen Einsatz ist die simultane Strategie sowohl für stationäre als auch individuelle Informations- bzw. Warnsysteme geeignet (Satow & Bernard, 2007; ZÖLLNER GmbH, 2004).

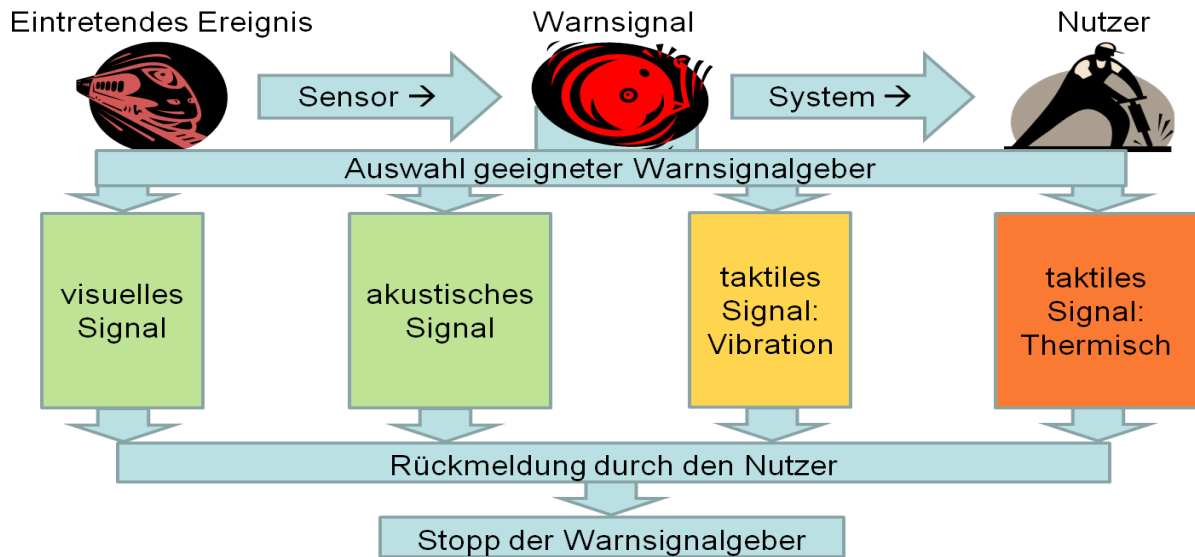


Abbildung 15 Simultane Signalübertragung

### 2.3.3.2 Kaskadierte Strategie

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, ist es sinnvoll, den Nutzer eines Informations- bzw. Warnsystems möglichst wenig bei der Ausführung seiner Arbeitstätigkeit zu stören bzw. zu unterbrechen. Das System könnte z.B. nach der kaskadierten Strategie mit einem nicht sehr stark belastenden visuellen Signal starten und erst dann die Meldung durch ein akustisches Signal ergänzen. Damit beschreibt die kaskadierte Strategie ein Vorgehen, das sich sehr gut an die Umgebungssituation anpassen lässt (DIN EN ISO 9241-110). Die Zusammenstellung der Signale verschiedener Signalgeber (z.B. visuell und akustisch) ist nicht statisch vorgegeben wie im Falle der simultanen Strategie, sondern lässt sich je nach Dringlichkeit individuell anpassen. So können Informationen weniger störend übermittelt und bei Nichtbeachtung, je nach Dringlichkeit, angepasst werden. Außerdem steigt beim Nutzer das Bewusstsein für die aktuelle Situation, da er eine Rückmeldung über die Dringlichkeit der Lage erhält. Dieses Situationsbewusstsein trägt dazu bei, dem Nutzer die Wahl der richtigen Reaktion zu erleichtern (Endsley, 1995; Endsley & Garland, 2000).

Für den praktischen Einsatz stellt die kaskadierte Strategie die vielversprechendere Lösung dar. Bei der Verwendung im Gleisbau tragen die Arbeitspersonen die Warnsysteme über den gesamten Arbeitstag. Hier ist es sinnvoll, eine hohe Akzeptanz zu erreichen, damit die Systeme auch tatsächlich kontinuierlich getragen werden. Die kaskadierte Strategie kann dazu beitragen, die Akzeptanz solcher Systeme zu erhöhen.

Für den Einsatz bei kollektiven Warnsystemen ist die kaskadierte Informations- bzw. Warnstrategie nur bedingt geeignet. Da diese Systeme das gleiche Signal an alle Personen gleichzeitig aussenden, ist eine individuelle Informierung bzw. Warnung der betreffenden Personen nicht möglich. Es kann lediglich z.B. ein Zeitabstand zu einem eintretenden Ereignis durch verschiedene Signalkaskaden abgebildet werden.

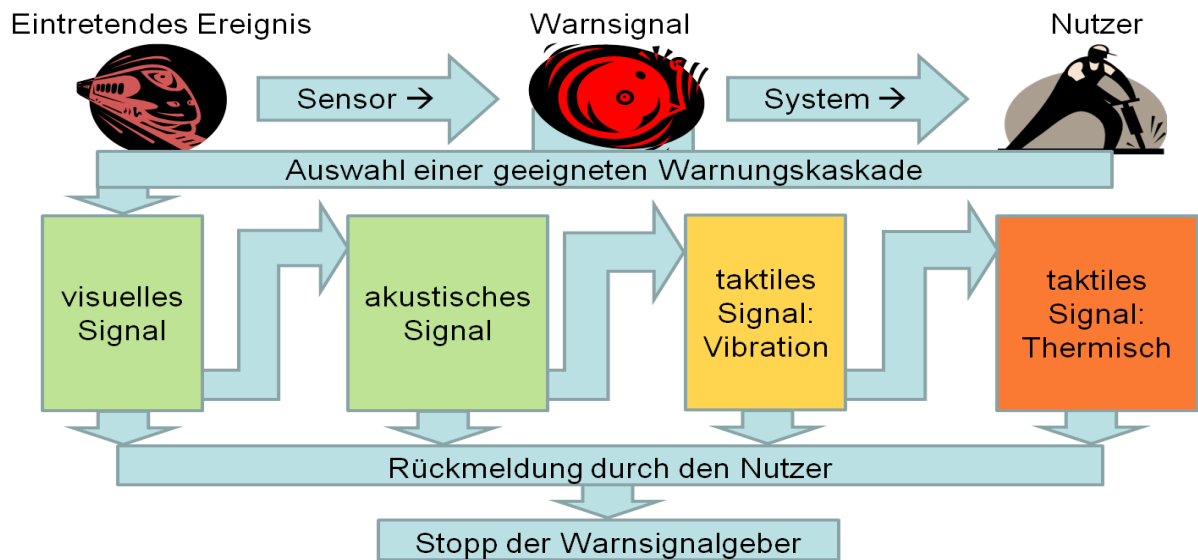


Abbildung 16 Signalübertragung durch Kaskaden

### 2.3.3.3 Fazit

Die simultane Strategie aus ausgewählten Einzelsignalen eignet sich im Zuge dieser Arbeit besonders gut, da hier die Signale besser analysiert werden können. Anpassungen an Parametern wie z.B. die Blinkfrequenz eines Signals können besser evaluiert werden, als es bei sich ändernden Signalen der kaskadierten Strategie der Fall ist.

Die kaskadierte Strategie wird nicht weiter betrachtet, da hier zuerst die Grundlagen in Form von nicht veränderlichen Signalen zu erarbeiten sind. Diese Signale, als Ergebnisse dieser Arbeit, können in einem weiteren Schritt als Grundlage genutzt werden, um eine Warnstrategie über Signalkaskaden zu entwickeln.

Nachdem die Informations- bzw. Warnstrategien nun behandelt wurden, müssen im nächsten Schritt die Bedeutungen der Signale erläutert werden, die diese Arbeit näher betrachtet.

### 2.3.4 Relevante Signale

In diesem Kapitel sollen die beiden Signale (Alarmierung und Warnung) vorgestellt werden, die innerhalb der Arbeit Verwendung finden. Es handelt sich in beiden Fällen um Gefahrensignale unterschiedlicher Dringlichkeit. Da der Anwendungskontext Gleisbau dieser Arbeit zu Grunde liegt, wurde auf die Betrachtung eines rein informierenden Signals verzichtet. Dieses

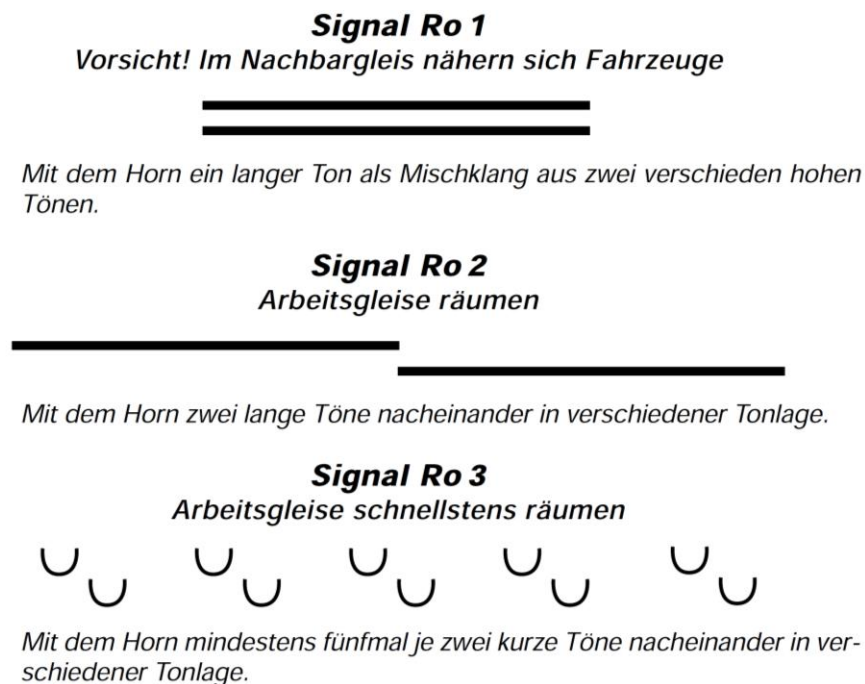
könnte in anderen Kontexten entsprechend ergänzend untersucht werden. Als kleiner Vorgriff auf Kapitel 2.4 „Kontext Gleisbau“ sollen hier bereits die dort relevanten Signale vorgestellt werden.

In Deutschland werden nach der Eisenbahnsignalordnung (ESO) vier Rottenwarnsignale (Ro1 bis Ro4) unterschieden.

Bei Ro1 handelt es sich um ein hinweisendes bzw. ein vor einer Gefahr warnendes Signal. Hier ist zwar eine Gefahr vorhanden, die betreffenden Personen müssen aber selbst entscheiden, ob eine Reaktion notwendig ist (DGUV Vorschrift 78).

Ro2 verkörpert hingegen eine unmittelbare Gefahr, ein Zug oder ein Ereignis machen es notwendig, das Arbeitsgleis zu verlassen. Noch dringlicher ist die Situation beim Einsatz von Ro3, das Gleis muss in diesem Fall sofort verlassen werden. Die Signale haben beide einen alarmierenden Charakter, eine Reaktion ist zwingend notwendig (DGUV Vorschrift 78).

Eine bildliche Darstellung mit kurzer Erklärung der ersten drei Rottenwarnsignale liefert Abbildung 17.



**Abbildung 17 Rottenwarnsignale (DGUV Vorschrift 78)**

Ro4 wird über ein visuelles Signal ausgedrückt. Es stellt eine weiße Fahne mit schwarzem Rand dar, die gut sichtbar neben den Gleisen positioniert wird. Sie kennzeichnet die sichere Zone, die während einer Vorbeifahrt eines Zuges aufgesucht werden muss (DGUV Vorschrift 78).

Innerhalb dieser Arbeit sollen die beiden Gefahrenzustände Ro1-Warnung und Ro3-Alarmierung betrachtet werden. Auch für andere Anwendungsfälle scheinen beide Signale gut geeignet, z.B. wird in der Schifffahrt zwischen einer Warnmeldung und einer Alarmmeldung unterschieden (DIN EN 60945). Allgemein wird dies durch (DIN EN 842) bestätigt, die ebenfalls die beiden Kategorien Warnsignale und Notsignale unterscheidet.

Die beiden Signale werden in Kapitel 3.3 als spezifische Signale in ihrer jeweiligen Modalität (visuell, akustisch oder taktil) gestaltet. In diesem Fall dienen die Signale zur Erweckung der Aufmerksamkeit des jeweiligen Nutzers und zur Übertragung relevanter Informationen. In Kapitel 3.6.3 werden zu beiden hier eingeführten Signalen Icons gestaltet, um dem Nutzer die Bedeutung des Gefahrensignals noch einmal geeigneter präsentieren zu können. In Kapitel 3.6.4 wird zum Abschluss des Prozesses zu beiden Gefahrensignalen jeweils eine spezifische Rückmeldung erarbeitet, mit der der Nutzer das jeweilige Signal richtig bestätigen muss, um letztendlich das Informations- bzw. Warnsystem nach verstandener Meldung wieder zu deaktivieren.

In den folgenden beiden Unterkapiteln sollen die Meldungen Warnung und Alarmierung noch einmal genauer definiert werden.

#### **2.3.4.1 Warnung**

Unter einer Warnung versteht (DIN EN 842) ein Signal „das den nahe bevorstehenden Beginn einer Gefahrenlage anzeigt, die geeignete Maßnahmen zur Beseitigung oder Kontrolle der Gefahr erfordern“. Diese Definition beschreibt bereits eine sehr dringliche Form der Warnung, da Maßnahmen getroffen werden müssen. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Begriff der Warnung etwas weiter gegriffen werden, so dass auch „Gebote“, „Hinweise“ oder der Zustand „Vorsicht – bereit sein“ mit eingeschlossen sind (DIN EN 981).

So passt das Beispiel des Ro1 Signals im Gleisbau sehr gut in diese Kategorie von Signalen und soll stellvertretend innerhalb dieser Arbeit die Warnmeldungen vertreten.

#### **2.3.4.2 Alarmierung**

Unter einer Alarmierung versteht DIN EN 842 ein Notsignal „das den Beginn oder das tatsächliche Vorhandensein einer Gefahrenlage anzeigt, die ein sofortiges Handeln erfordert“.

Damit steht die Alarmierung auf die Dringlichkeit einer Reaktion bezogen höher als die Warnung. Im Zuge dieser Arbeit wird das Ro3 Signal gleich einer Alarmierung gesetzt. Ro2 entspricht von der Bedeutung her einem Ro3 Signal, nur die Dringlichkeit der Situation ist bei Ro3 höher. Diese Anpassung der Dringlichkeit, im Sinne einer kaskadierten Strategie, stellt

aber keinen Bestandteil dieser Arbeit dar, deswegen wird hier nur das dringlichste Signal weiterverfolgt. Dieser Aspekt soll im folgenden Kapitel genauer erklärt werden.

Nach der allgemeinen Erläuterung und Einteilung gängiger Informations- bzw. Warnsysteme sowie den Ausführungen zu den in der Arbeit verwendeten Signalen, soll nun der Kontext Gleisbau als begleitendes Anwendungsbeispiel eingeführt werden.

## 2.4 Kontext Gleisbau

In diesem Kapitel sollen die bisher eher allgemein gehaltenen Ausführungen über Informations- bzw. Warnsysteme auf den Gleisbau als das Anwendungsbeispiel, das dieser Arbeit zugrunde liegt, konkretisiert werden. Mit dem Arbeitssystemmodell nach Schlick et al. (2010) können die wesentlichen Punkte anschaulich zusammengefasst werden, die im Verlauf des Kapitels zu behandeln sind.

### 2.4.1 Arbeitssystem

Arbeitssysteme kommen in vielen Formen vor. Das Arbeitssystemmodell nach Schlick et al. (2010) schafft ein allgemeingültiges Ordnungsschema, das Arbeitssysteme vergleichbar macht. Es gliedert sich in die Elemente Arbeitsauftrag, Arbeitspersonen, Arbeitsaufgabe, Arbeitsmittel, Arbeitsobjekte, Eingabe, Ausgabe und Umgebungseinflüsse (siehe Abbildung 18).

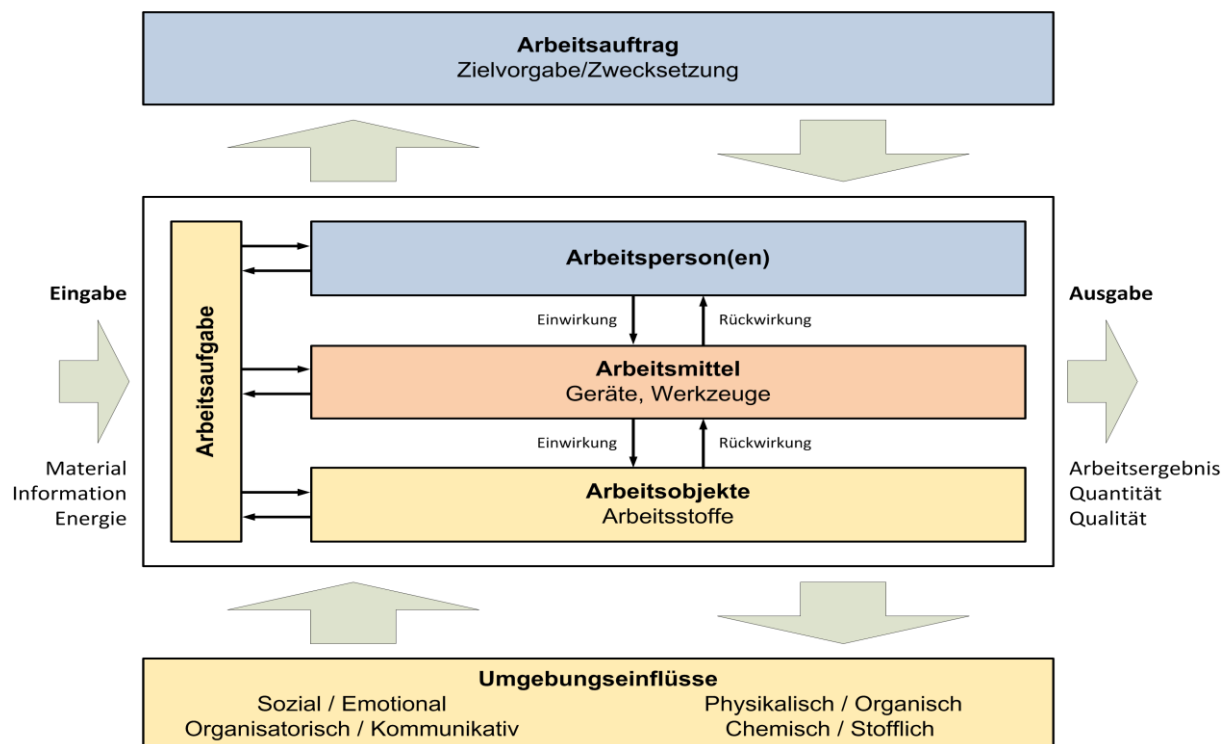


Abbildung 18 Arbeitssystemmodell (Schlick et al., 2010)

Auf den „Arbeitsauftrag“ sowie die „Ein- und Ausgabe“ soll hier nicht näher eingegangen werden. Die möglichen Inhalte sind so vielfältig, dass dies den Fokus dieser Arbeit überschreiten würde. In den folgenden beiden Kapiteln 2.4.2 und 2.4.3 soll auf die beiden Komponenten „Umgebungsbedingungen“ (im Modell „Umgebungseinflüsse“) und „Arbeitsaufgabe, Arbeitsmittel und Arbeitsobjekte“ des Arbeitssystemmodells näher eingegangen werden. Der Kontext Gleisbau dient hierbei als begleitendes Beispiel aus der Praxis.

## **2.4.2 Umgebungsbedingungen**

Die Arbeit im Gleisbau findet unter komplexen Umgebungsbedingungen statt. Dabei variieren die Umgebungen in denen Schienen verbaut werden sehr stark, da der Zugverkehr in nahezu jeder Region der Erde eingesetzt wird. Informations- bzw. Warnsysteme müssen für diese Bedingungen ausgelegt werden, um sicher funktionieren zu können.

Um bei der Betrachtung der maßgeblichen Einflüsse trotzdem systematisch vorgehen zu können, soll eine Einteilung der Umgebungsbedingungen bezüglich der Wahrnehmungskanäle des Menschen vorgenommen werden.

### **Visuell:**

Hier sind vor allem die Beleuchtungsbedingungen durch künstliches oder natürliches Licht entscheidend. Minimale Beleuchtungen kommen in der Nacht, an sehr abgeschatteten Stellen, aber auch in Tunneln vor. Hier muss der Arbeitgeber eine mittlere Beleuchtungsstärke von 50 Lux garantieren (BGI 5081). Das umgekehrte Extrem tritt bei Baustellen in extrem hellen Umgebungen auf. An wolkenlosen Sommertagen können z.B. Beleuchtungsstärken bis 100.000 Lux auftreten (Bokranz & Landau, 1991). Zustände, bei denen sich solche Extreme abwechseln, können z.B. an Tunnellein- und ausgängen auftreten. Auch besondere Wettervorkommnisse wie Regen, Nebel und Schnee können die Sicht beeinträchtigen oder im Falle einer Schneedecke sogar zu Blendung führen.

Zusätzlich kommt es auf den meisten Baustellen zu einer Belastung durch Staub und Schmutz, der entweder bei den Arbeiten entsteht oder durch z.B. Wind aufgewirbelt wird. Auch diese Komponenten können die Sicht einschränken oder das Ablesen möglicher visueller Anzeigen erschweren.

### **Akustisch:**

Im Gleisbau muss mit hohen Störschallpegeln gerechnet werden. Vorbeifahrende Züge und starker Maschinenlärm sind dabei die maßgeblichen Störschallquellen (Alldieck, 2013; Sauer, 2006). Die im Gleisbau eingesetzte Schotterplaniermaschine erzeugt dabei den meisten Lärm



von 113 dB(A) (DGUV Information 201-021; Sauer, 2003). Sogar Züge, die auf dem dritten Gleis vorbeifahren, müssen mit 100 dB(A) berücksichtigt werden.

**Taktil:**

In diesem Bereich liegen zwei Kategorien an Umgebungsbedingungen vor. Zum einen liegen je nach Region der Gleisbaustelle andere klimatische Bedingungen vor. Hier sind Zustände von sehr niedrigen Temperaturen mit Eis und Schnee bis zu sehr hohen Temperaturen mit hoher oder niedriger Luftfeuchtigkeit möglich (BGI 5081; BGI 579). Zum anderen treten im Bereich der Gleisbaustelle starke mechanische Schwingungen auf, die teils durch vorbeifahrende Züge, Großmaschinen wie Bauzüge oder schwere Handmaschinen (z.B. Hochdruckschrauber) erzeugt werden (BGI 5081).

**2.4.3 Arbeitsaufgabe, Arbeitsmittel und Arbeitsobjekte**

Zunächst sollen die drei Begriffe Arbeitsaufgabe, Arbeitsmittel und Arbeitsobjekte kurz erklärt werden, um anschließend einige Besonderheiten in Bezug auf Warnsysteme abzuleiten.

**Arbeitsaufgabe:**

Bei Aufgaben im Gleisbau handelt es sich hauptsächlich um Neubau- oder Instandsetzungsarbeiten rund um die Gleise. Dazu zählen Gleisbettarbeiten, Schienenerneuerung oder -reparatur, Arbeiten an Oberleitungen, aber auch Vegetationsarbeiten neben den Gleisanlagen. Bauliche Tätigkeiten wie die Erbauung von Bahnübergängen zählen ebenfalls zu den Einsatzfeldern. Dabei handelt es sich um überwiegend schwere körperliche Arbeit.

**Arbeitsmittel:**

Zu den Arbeitsmitteln zählt neben dem Einsatz unterschiedlicher Maschinen auch eine persönliche Schutzausrüstung (PSA). Diese soll den Gleisarbeiter vor gefährlichen Einwirkungen auf der Baustelle schützen. Beispielsweise muss der Arbeiter vor Maschinenlärm, Staub oder gefährlichen Stößen durch Arbeitsobjekte bewahrt werden. Konkrete Beispiele einer PSA auf einer Gleisbaustelle stellen eine Warnweste, die Schutzbrille, Kapselgehörschützer oder Handschuhe dar (DGUV Vorschrift 78).

Warnsysteme gehören ebenso zu den Arbeitsmitteln einer Baustelle, sie warnen den Gleisarbeiter vor herannahenden Zügen. Entweder existieren kollektive Systeme, die am Baustellenrand angeordnet werden, oder die betroffenen Personen tragen individuelle Warnsysteme als Teil ihrer Schutzausrüstung.

**Arbeitsobjekte:**

Bei den Arbeitsobjekten handelt es sich in den meisten Fällen um gröbere Bauteile, die durch den Einsatz von Maschinen oder größerer Krafteinwirkung verbaut werden. Durch die Dimensionen der Bauteile und die vielfältigen Einbaumöglichkeiten können extreme Arbeitshaltungen wie z.B. Kriechen auftreten. Diese müssen bei der Auslegung von Informations- bzw. Warnsystemen berücksichtigt werden, um auch dort ein sicheres Tragen zu ermöglichen.

Zusammenfassend ist es wichtig festzuhalten, dass im Bereich des Gleisbaus eher grobmotorische Tätigkeiten ausgeführt werden. Dabei sind große Bauteile durch den Einsatz von schweren Maschinen zu bearbeiten. Damit der Gleisarbeiter bei der Ausführung dieser Tätigkeiten so wenig wie möglich gestört wird, müssen Warnsysteme der Dringlichkeit der Situation angemessen funktionieren, eine gute Wahrnehmbarkeit bieten und klar unterscheidbare Warnungen liefern. Außerdem sollten sie robust genug sein, um in diesem komplexen Arbeitsfeld keinen Schaden zu nehmen.

## 2.5 Analyse bestehender Systeme und Signale

Nach der Betrachtung des Kontexts Gleisbau sollen nun die momentan bestehenden Informations- bzw. Warnsysteme und deren Signale näher betrachtet werden. In Kapitel 2.3.2 wurde bereits eine Kategorisierung bestehender Systeme vorgenommen, um ein besseres Verständnis der Systeme zu ermöglichen. In diesem Kapitel werden konkrete Systeme oder Schutzrichtungen kurz vorgestellt und bewertet. Anhand der Bewertung können im weiteren Verlauf Schwachstellen und Entwicklungspotentiale aufgedeckt werden.

### 2.5.1 Gleisbau

In Deutschland gibt es feste Richtlinien, die über den Einsatz der Sicherungsmaßnahmen an den jeweiligen Gleisbaustellen entscheiden. Die Unfallverhütungsvorschrift (DGUV Vorschrift 78) der Eisenbahn-Unfallkasse legt dabei die Maßnahmen fest und wird durch die DGUV Regel 101-024 und DGUV Information 201-021 ergänzt.

Automatische Warnsysteme sind bei der Sicherung von Gleisbaustellen nach den Vorschriften nicht die an erster Stelle liegende Sicherungsmaßnahme (DGUV Vorschrift 78). Vielmehr wird zuallererst eine Sperrung des Gleises bzw. des Nachbargleises angestrebt, gefolgt von festen Absperrmaßnahmen, um eine räumliche Trennung zwischen Mensch und Gefahr zu erreichen (vgl. Abbildung 19).



**Abbildung 19 Sperrung des Arbeitsgleises (DGUV Information 201-021)**

Ist dies in begründeten Fällen nicht möglich, werden als nächste Maßnahme dieser Rangfolge automatische Warnsysteme eingesetzt. Eine vollständige Übersicht der Sicherungsverfahren liefert die Rangreihenfolge nach RIMINI (DGUV Information 201-021), hier werden auch noch weitere Verfahren aufgeführt. Weiterhin schreibt die Richtlinie 89/391/EWG vor, dass kollektive Systeme immer Vorrang vor individuellen Systemen haben (Manteuffel, 2013).

Ein entscheidender Punkt beim Einsatz von Warnsystemen ist die Sicherheitsfrist, also die Zeitspanne zum sicheren Verlassen des befahrenen Gleises. In der Sicherheitsfrist ist bereits eine Räumzeit von 5 Sekunden mit einberechnet, um z.B. größere Maschinen von den Gleisen zu entfernen (DGUV Regel 101-024; DGUV Information 201-021). Die Sicherheitsfrist kann bei automatischen Warnsystemen bis zu 30 Sekunden betragen (DGUV Regel 101-024).

### **Kollektive Warnsysteme:**

In Deutschland werden überwiegend zwei kollektive Warnsysteme eingesetzt, das Autoprowa-System der Zöller GmbH und das MINIMEL 95-System der SCHWEIZER ELECTRONIC AG (Sauer, 2003). Die Systeme werden entlang der Gleisbaustelle aufgestellt (vgl. Abbildung 20) und nutzen die visuelle und akustische Wahrnehmung des Menschen. Die neueren Systeme geben akustische Signale ab, die sich automatisch an den Störschallpegel anpassen (Sauer, 2003). Zusätzlich existieren sogenannte Erinnerungsleuchten, die parallel ein visuelles Signal abgeben (Manteuffel & Bärenz, 2012). Momentan geben die akustischen Signalgeber je nach Firma unterschiedliche Warntöne ab, wobei in Zukunft die Nutzung einheitlicher Signale angestrebt wird (Dantscher & Sauer, 2011; Sauer, 2006).



Abbildung 20 Kollektives Warnsystem (DGUV Information 201-021)

### Individuelle Warnsysteme:

Individuelle Warnsysteme stellen eine spezielle Form der automatischen Warnsysteme dar. Diese sind in Deutschland nur an gesperrten Arbeitsgleisen mit Zugverkehr auf dem Nachbargleis zu verwenden (Manteuffel & Bärenz, 2012; Satow & Bernard, 2007; Schweizer, 2006).



Abbildung 21 Individuelles Warnsystem (Schweizer, 2006)

Momentan ist in Deutschland nur ein individuelles Warnsystem der SCHWEIZER ELECTRONIC AG zugelassen. Dieses wird am Gürtel oder in einem Rucksack getragen und kommuniziert drahtlos. Es übermittelt ausschließlich akustische Signale, die über Kopfhörer übertragen werden. Das System eignet sich für den Einsatz mit Kapselgehörschützern (Manteuffel & Bärenz, 2012). Weitere Systeme existieren zwar, sind aber entweder in Deutschland nicht zugelassen oder befinden sich noch in einem Prototypenstadium. Da die momentanen Systeme nur als Ergänzung zu den kollektiven Systemen und immer unter der Aufsicht von Sicherungspersonal eingesetzt werden dürfen, gab es noch keine Bestrebungen eine Rückmeldungsfunktion zu implementieren. Das individuelle Warnsystem funktioniert wie ein tragba-

rer Lautsprecher des kollektiven Systems und wird somit auch simultan angesteuert. Die Warntöne können nicht durch den Träger deaktiviert werden. Zusätzlich zu den Warnsignalen ertönt in regelmäßigen Abständen ein Kontrollton, der die Bereitschaft des Systems anzeigt.

### **Forschung zu individuellen Warnsystemen:**

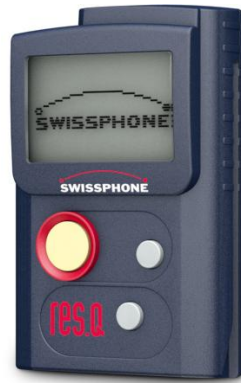
An der Technischen Universität Dresden wird an einem Forschungsvorhaben gearbeitet, das bei zukünftigen individuellen Warnsystemen zum Einsatz kommen könnte. Hier werden leichte elektrische Reize zur Signalübertragung an den Menschen genutzt (Bärenz et al., 2014). Das System befindet sich noch in der Erprobung und könnte bestehende Systeme ergänzen, indem ein zusätzlicher Kanal zur redundanten Übertragung genutzt wird (Bärenz et al., 2014).

Die Technische Universität Darmstadt beteiligte sich an einem EU-Projekt namens ALARP, das 2010 startete. Es beschäftigte sich mit der Entwicklung eines automatischen Warnsystems basierend auf mobilen Endgeräten (Schultheis, Wakula, Röbig, & Bruder, 2012; Seminatore et al., 2012; Wakula, Schultheis, Bruder, & Kalenahalli Sudarshan, 2011; Wakula et al., 2011). Zum Einsatz kam ein multimodales Warnsystem, das den visuellen und den akustischen Kanal des Menschen nutzte. Außerdem wurde eine Möglichkeit der Rückmeldung durch GPS Ortung integriert. Das Projekt endete 2013 und lieferte wichtige Erkenntnisse zu individuellen Warnsystemen auf europäischer Ebene. Das System wurde auf seine Wirksamkeit getestet (Schultheis, Wakula, Theuerling, & Bruder, 2011) und auch die Sensoren bzw. die Weiterleitung der Signale funktionierten zuverlässig.

### **2.5.2 Weitere Informations- bzw. Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten**

In diesem Kapitel sollen, nach der Vorstellung gängiger Warnsysteme aus dem Bereich des Gleisbaus, weitere Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten erläutert werden.

Das Alarmierungssystem der Swissphone Telecommunications GmbH (vgl. Abbildung 22) dient dazu, Einsatzkräfte der Feuerwehr über einen bevorstehenden Einsatz zu informieren. Das Gerät ist robust gebaut und kann direkt am Gürtel getragen werden. Zur Alarmierung dient ein akustisches Warnsignal ergänzt durch einen Vibrationsalarm und ein blinkendes Display. Informationen können ebenfalls über das Display abgelesen werden. Das Gerät ermöglicht eine Rückmeldung an die Leitstelle. Dies geschieht über die Auswahl vorformulierter Textnachrichten auf dem Display. Für die Bedienung sind drei Tasten im Gehäuse integriert. Zusätzlich enthält das System ein GPS zur Positionsbestimmung (Swissphone Telecommunications GmbH, 2014).



**Abbildung 22 RES.Q ein Alarmierungssystem mit Rückmeldung durch den Nutzer (Swissphone Telecommunications GmbH, 2014)**

Das tragbare Gaswarngerät der Firma Industrial Scientific wird an Arbeitsplätzen unter Tage eingesetzt und ist entsprechend robust ausgeführt (vgl. Abbildung 23). Es detektiert gefährliche Konzentrationen von schädlichen Gasen. Getragen wird das Gerät offen auf der Kleidung, damit die Umgebungsluft ungehindert analysiert werden kann. Zur Alarmierung dienen extrem helle LEDs, ein lauter akustischer Alarm und ein Vibrationsalarm. Informationen können über das Display abgelesen werden. Zur Bedienung sind zwei Tasten in das Gehäuse integriert (Industrial Scientific, 2015).



**Abbildung 23 Tragbares Gaswarngerät (Industrial Scientific, 2015)**

Das D2SENSE Warnsystem soll Arbeitspersonen vor großen Baufahrzeugen (z.B. Baggern) schützen. Das Warnsystem besteht aus einer Komponente im jeweiligen Fahrzeug und einem Mobilteil im Besitz der Arbeitsperson und ist für die Bedingungen im Baualltag entsprechend robust ausgeführt (vgl. Abbildung 24). Beide Systemkomponenten kommunizieren über Funk miteinander und warnen den Fahrzeugführer bzw. die Arbeitsperson, wenn es zu einer gefährlichen Annäherung kommt. Dies geschieht über ein akustisches Signal und blinkende LEDs. Das Mobilteil verfügt zusätzlich über einen Vibrationsalarm. Informationen können über LEDs auf den Geräten abgerufen werden. Die Bedienung läuft über Taster auf dem Gehäuse (Lewandowski, 2015).



Abbildung 24 D2SENSE Warnsystems (Lewandowski, 2015)

## 2.6 Defizite an bestehenden Informations- bzw. Warnsystemen

In diesem Kapitel werden die zuvor vorgestellten Informations- bzw. Warnsysteme hinsichtlich ausgewählter Kriterien verglichen und einzelne Defizite aufgezeigt. Anschließend erfolgt die Diskussion weiterer Defizite an Informations- bzw. Warnsystemen über die genannten Systeme hinaus.

Der Vergleich der vorgestellten Informations- bzw. Warnsysteme erfolgt über Tabelle 2:

Tabelle 2 Vergleich der vorgestellten Informations- bzw. Warnsystemen

Systeme	visuelles Signal	akustisches Signal	taktiler Signal	zusätzliche Informationen über ein Display	Rückmeldefunktion	Defizite:
feste Absperrung	X					<ul style="list-style-type: none"> <li>Nicht an allen Baustellen realisierbar</li> </ul>
kollektives Warnsystem (Gleisbau)	X	X				<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine individuellen Signale</li> <li>Visuelle Signale nicht immer im Gesichtsfeld</li> <li>Kritische Lärmbelästigung</li> <li>Muss durch Sicherungsposten überwacht werden</li> </ul>
individuelles Warnsystem (Gleisbau)		X				<ul style="list-style-type: none"> <li>Visuelle Signale nicht immer im Gesichtsfeld</li> <li>Signalübertragung nicht redundant über mehrere Sinneskanäle</li> <li>Muss durch Sicherungsposten überwacht werden</li> </ul>
ALARP System	X	X		X		<ul style="list-style-type: none"> <li>Visuelle Signale nicht immer im Gesichtsfeld</li> </ul>
RES.Q Alarmierungssystem	X	X	X	X	X	<ul style="list-style-type: none"> <li>Visuelle Signale nicht immer im Gesichtsfeld</li> </ul>

						<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rückmeldung nur über Textnachrichten</li> <li>• Keine unterschiedlichen Gefahrenmeldungen möglich</li> </ul>
Gaswarngerät	X	X	X	X		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visuelle Signale nicht immer im Gesichtsfeld</li> <li>• Visuelle Signalgeber ermöglichen nur Gefahrenmeldungen in einer Farbe</li> </ul>
D2SENSE Systems	X	X	X			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visuelle Signale nicht immer im Gesichtsfeld</li> <li>• Keine unterschiedlichen Gefahrenmeldungen möglich</li> </ul>
X = System erfüllt die Forderung						

Die sicherste Möglichkeit, Mensch und Gefahr voneinander zu trennen, ist eine Absperrung der Baustelle. Leider ist dies in vielen Fällen nicht möglich, z.B. können gerade viel befahrene Gleise oft nicht dauerhaft gesperrt werden. Deshalb ist es wichtig, effektive Informations- bzw. Warnsysteme zu besitzen, die den Schutz der Baustelle dennoch gewährleisten.

Kollektive Warnsysteme im Gleisbau übernehmen diesen Schutz, sind aber in die Kritik der Öffentlichkeit geraten, da der erzeugte Lärm für Anwohner oft nicht ertragbar erscheint (Manteuffel, 2013). Darüber hinaus können die Signale in bestimmten Situationen schwer wahrnehmbar sein (Scholz & Schombierski, 2011). Besonders die visuellen Signale über Erinnerungsleuchten liegen oft außerhalb des Gesichtsfelds und können deshalb nicht als redundanter Signalgeber betrachtet werden.

Der Einsatz individueller Warnsysteme in Gleisbau ist nach momentanem Sachstand höchstens für Vegetationsarbeiten in Aussicht (Bärenz et al., 2014). Auch diese Systeme warnen rein akustisch und können genau wie die kollektiven Systeme nur im Beisein von Sicherungsposten betrieben werden. Darüber hinaus sitzen die Signalgeber in den Ohren und erschweren so die Kommunikation oder die Wahrnehmung der Umwelt.

Das ALARP System griff bereits viele Schwachstellen bestehender Systeme auf, Probleme ergaben sich allerdings bei der Rückmeldungsfunktion über das GPS Signal. Eine das Warnsystem tragende Person konnte nicht ausreichend genau geortet werden, so war es nicht möglich festzustellen, ob die Person wirklich in Sicherheit war. Auch das mobile Warnsystem selbst wurde vorerst nur durch einen Laptop simuliert, was für die Praxis nicht praktikabel wäre. Hier besteht weiterer Entwicklungsbedarf, genauso wie bei den noch nicht ausgereiften Warnsignalen.

Die Systeme aus anderen sicherheitskritischen Arbeitskontexten verfügen bereits über mehrere Signalgeber zur redundanten Signalübertragung. Allerdings befinden sich die visuellen



Signalgeber außerhalb des Gesichtsfeldes. Dies könnte zu Problemen bei der Wahrnehmung führen. Auch sind die meisten Systeme nicht für die Übermittlung mehrerer Gefahrensignale gerüstet, so existieren z.B. keine mehrfarbigen LEDs zur Wiedergabe verschiedener Signale. Die Unterscheidung verschiedener Signale nur über Signalparameter wie z.B. die Blinkfrequenz könnte zu Verwechslungen führen.

Ein Problem, das allen Systemen anhaftet, ist, dass die Handlungsintention des Nutzers nicht über das Informations- bzw. Warnsystem abgefragt wird. Es bleibt unklar, ob der Nutzer die Meldung richtig oder überhaupt empfangen hat. Lediglich das System der Feuerwehr nutzt eine Funktion zur Rückmeldung über Textnachrichten. Eine Möglichkeit in einer stressigen Situation ohne das Lesen eines Textes eine Rückmeldung zu geben, existiert noch nicht.

Auch andere Vorhaben in Deutschland belegen, dass im Bereich der Informations- bzw. Warnsysteme noch Handlungsbedarf besteht. Dies belegt ein Kooperationsprojekt der Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU), der Eisenbahn-Unfallkasse (EUK) und der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin e.V. (FSA). Unter dem Namen „Beurteilung des Einsatzes der individuellen Warnung im bzw. am Gleisbereich – insbesondere unter Berücksichtigung der Trageakzeptanz von individuellen Warngeräten für bestimmte Arbeitsstellen“ (Bärenz et al., 2014; Manteuffel, 2013; Manteuffel & Bärenz, 2012) wurden Studien an bestehenden individuellen Warnsystemen durchgeführt und die arbeitsorganisatorische Umsetzung diskutiert.

Ein Grund für das Projekt ist die bereits angesprochene immer größer werdende Anzahl an Klagen durch die Öffentlichkeit über Lärmbelästigung im Zusammenhang mit kollektiven Warnsystemen (z.B. während des Großprojekts Stuttgart 21) im Gleisbau (Manteuffel & Bärenz, 2012). Der Druck auf die Betreiberfirmen steigt und es müssen sogar Baustellen durch richterlichen Beschluss ihre Arbeit einstellen.

Die Ergebnisse des Projektes wurden am 11.10.2012 in einem Symposium in Mannheim präsentiert und diskutiert. Anwesend waren Vertreter der Unfallkassen, der Netzbetreiber, der Hersteller von Warnsystemen sowie zwei Universitäten. Die Ergebnisse des Projektes verdeutlichten, dass momentane individuelle Warnsysteme ungeeignet für den praktischen Einsatz sind und nur für klar definierte Situationen eingesetzt werden dürfen (Manteuffel, 2013). Eine sichere Wahrnehmung mittels der existierenden Systeme ist, ohne eine Kontrolle durch Dritte, eher fraglich. Auch hier kam die Forderung auf, in Zukunft mehr Forschung im Bereich der Warnsysteme zu betreiben und besonders multimodale Systeme stärker in den Fokus zu rücken.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Bedarf an der Entwicklung von multimodalen Warnsystemen vorhanden ist. Besonders das Zusammenspiel der verschiedenen Modalitäten in unterschiedlichen Situationen stellt eine Herausforderung dar. Die Vermittlung der Dringlichkeit in einer bestimmten Situation ist von besonderer Bedeutung (Biernath, Hornberger, & Rätzer-Frey, 1997). Visuelle oder taktile Signale könnten die bestehenden Signale dabei sinnvoll ergänzen.

Besonders der traditionell verwendete akustische Sinneskanal des Menschen ist auf Baustellen stark beansprucht (z.B. durch Kommunikation oder Lärm) und wird zusätzlich durch das Tragen von Gehörschutz stark beeinträchtigt. Hier sollte nach einem Weg geforscht werden, der eine sichere Warnung ermöglicht und gleichzeitig die Kommunikation mit der Außenwelt zulässt. Dabei darf das Tragen des Gehörschutzes nicht behindert werden.

Allerdings sollte bei der Entwicklung neuer Prototypen auch darauf geachtet werden, nicht ausschließlich nach geeigneten Übertragungswegen zu forschen, sondern gleichzeitig die zu vermittelnden Signale nicht außer Acht zu lassen. Hier sollten für die geforderten Informations- oder Gefahrenmeldungen gut erkennbare und unterscheidbare Signale konzipiert werden. Zusätzlich müssen diese Signale in ihrer Dringlichkeit angepasst werden können, wie dies z.B. durch die Verwendung von Signalkaskaden möglich wäre.

Auch bei den arbeitsorganisatorischen Herausforderungen (Manteuffel, 2013), die die Einführung individueller Warnsysteme mit sich bringen wird, sollte nach neuen Ansätzen geforscht werden. Hier könnte die Einführung einer spezifischen Rückmeldefunktion durch den Nutzer den entstandenen Unsicherheiten (z.B. ungenaue GPS Ordnung) entgegenwirken. Gleichzeitig würde dieser Schritt die Sicherungsunternehmen entlasten, die momentan für die Sicherheit der Gleisarbeiter zuständig sind.

Letztendlich muss nach ganzheitlichen Ansätzen geforscht werden, die gleichzeitig den Arbeitskontext nicht außer Acht lassen (Biernath et al., 1997). Innerhalb dieser Arbeit soll versucht werden, dafür einen Grundstein zu legen. Durch Erstellung eines neuen Warnmodells, das die wesentlichen Vorgänge innerhalb eines Informations- bzw. Warnübertragungsprozesses aufzeigt, wird eine breite Grundlage geschaffen. Danach sollen für die drei Stufen „Erweckung der Aufmerksamkeit“, „Übertragung der relevanten Informationen“ und „Rückmeldung durch den Nutzer“ multimodale Konzepte erarbeitet und durch ein für das Labor ausgelegtes Versuchskonzept überprüft werden. Die Entwicklung von dafür notwendigen Prototypen und Signalen verlief über ein iteratives Vorgehen. Damit deckt die Arbeit die immer wieder geforderte Entwicklung und Überprüfung eines multimodalen Informations- bzw. Warnsystems

ab. Die Entwicklung der Signale zielte auf die Parameter ab, über welche die Dringlichkeit gesteuert werden kann. Bei den erarbeiteten Signalen handelt es sich um möglichst dringliche Signalausprägungen.

Darüber hinaus steht die Erarbeitung adaptiver Signale über die Verwendung von Kaskaden noch für weitere Arbeiten aus. Auch die Übertragung des Versuchskonzeptes in das reale Feld bleibt zukünftigen Projekten vorbehalten.

### **3 Entwicklung von Konzepten für Informations- und Warnsysteme**

Nachdem am Ende des letzten Kapitels die Defizite existierender Informations- bzw. Warnsysteme erarbeitet wurden, sollen nun Lösungen gestaltet werden. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Entwicklung der Konzepte mit den dazugehörigen Prototypen und Signalen für Informations- und Warnsysteme.

Dazu wird zunächst ein neues Modell für Informations- bzw. Warnsysteme vorgestellt (vgl. Kapitel 3.1) und mit dessen Hilfe die Forschungsfragen dieser Arbeit beschrieben (vgl. Kapitel 3.2).

In den drei folgenden Kapiteln sollen Gestaltungshinweise zur Entwicklung von Informations- bzw. Warnsystemen gegeben werden. Die Vorgehensweise orientiert sich dabei an den in Kapitel 2 beschriebenen drei Stufen „Erweckung der Aufmerksamkeit“ (vgl. Kapitel 3.3), „Übertragung der relevanten Informationen“ (vgl. Kapitel 3.4) und „Rückmeldung durch den Nutzer“ (vgl. Kapitel 3.5).

In Kapitel 3.6 werden dann die Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen vorgestellt und ihre Entwicklungsschritte beschrieben. Auch hier wird nach den in Kapitel 2 beschriebenen drei Stufen vorgegangen. Bis zum Ende des Kapitels setzt sich so sukzessive ein vollständiges Informations- bzw. Warnsystem zusammen, das über ein in Kapitel 4 entwickeltes Versuchskonzept getestet werden soll.

#### **3.1 Modell für Informations- und Warnsysteme**

Die Entwicklung eines Mensch-Maschine Modells für Informations- und Warnsysteme (siehe Abbildung 25) soll dazu dienen, Zusammenhänge besser erklären und verstehen zu können. Außerdem vereinfacht es die Vorstellung der Forschungsfragen (vgl. Kapitel 3.2), die durch eine Studie basierend auf dem Versuchskonzept (vgl. Kapitel 4), überprüft werden.

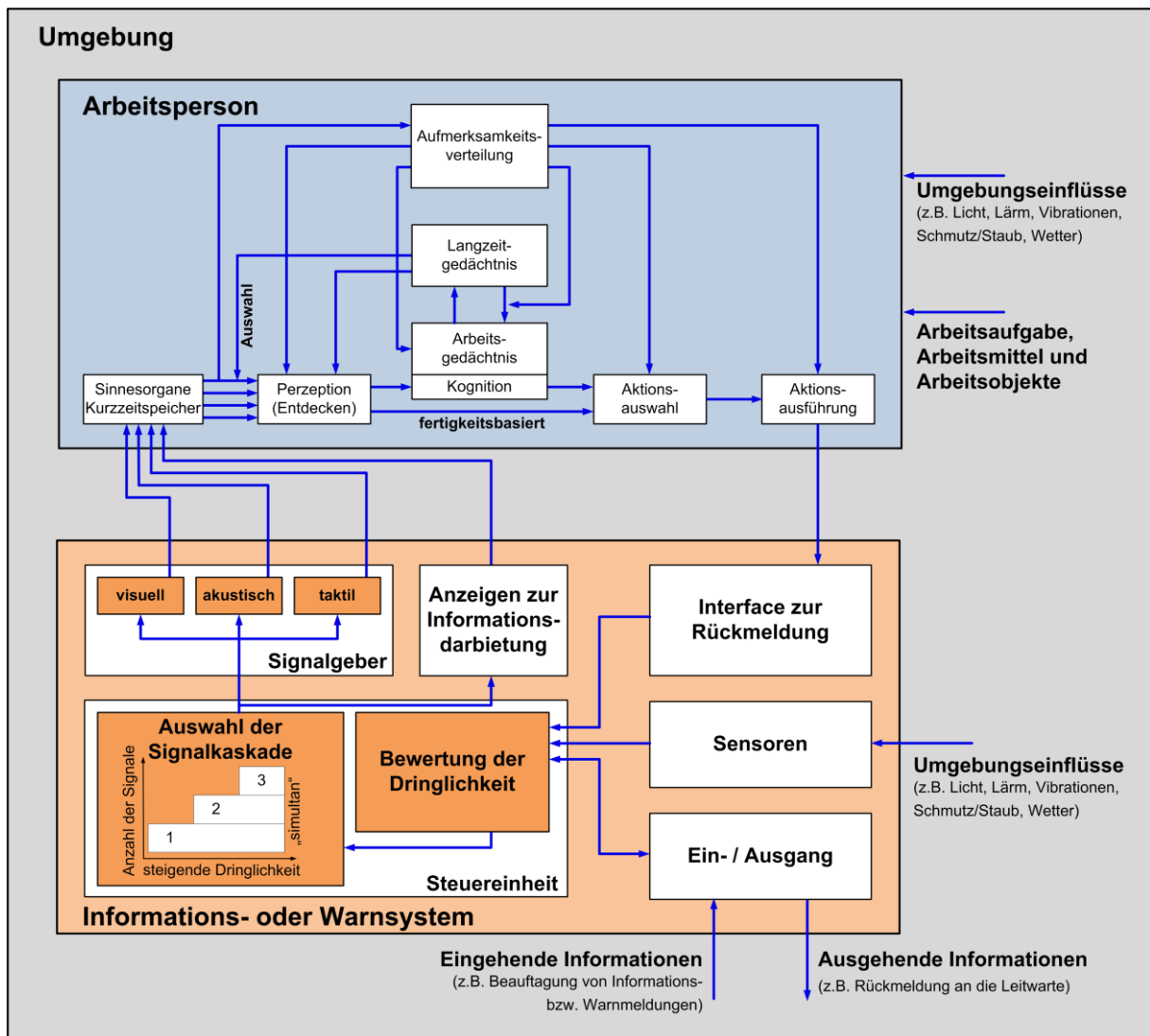


Abbildung 25 Mensch-Maschine Modell für Informations- und Warnsysteme (in Anlehnung an (Wickens & Hollands, 2000 und Johannsen, 1993)

Das Modell kombiniert zwei verschiedene Modelle und erweitert diese um die spezifischen Vorgänge innerhalb der Interaktion mit Informations- bzw. Warnsystemen. Der Gesamtaufbau des Modells orientiert sich am Mensch-Maschine Modell nach Johannsen (1993) und ermöglicht es, alle Vorgänge der Mensch-Maschine Interaktion, sowie die Einflüsse auf diese Vorgänge beschreiben zu können. In dieses eingebettet findet sich das erweiterte Informationsverarbeitungsmodell nach Wickens und Hollands (2000) (vgl. Kapitel 2.2.1) zur Beschreibung der Arbeitsperson wieder.

Das Informations- bzw. Warnsystem funktioniert nach einem Regelkreis. Die Steuereinheit erfasst sensorisch (Umgebungseinflüsse wie z.B. der Beleuchtungszustand) oder über äußere Eingaben durch den Eingang (z.B. beauftragte Gefahrenmeldungen) die vorliegenden Informationen. Es kommt zu einer Interpretation der Dringlichkeit der Situation und zur Auswahl eines geeigneten Signals. Dieses wird über die jeweiligen Signalgeber an die Arbeitsperson

ausgestrahlt. Zusätzlich werden über Anzeigen geeignete Informationen an den Nutzer übermittelt. Das Rückmeldungsinterface ist aktiv und bereit, die Eingaben durch die Arbeitsperson zu empfangen. Die Arbeitsperson erhält noch während der Eingabe eine Rückmeldung über die Korrektheit der Eingaben. Damit schließt sich der Kreis, denn mit der Rückmeldung ist das System in der Lage zu entscheiden, ob der Vorgang erfolgreich abgeschlossen werden kann oder es einer weiteren, der Dringlichkeit angepassten Information bzw. Warnung bedarf. Diese Informationen werden zusätzlich über den Ausgang an weitere Systeme z.B. eine Leitwarte übermittelt.

Die Arbeitsperson ist innerhalb des Modells in Anlehnung an das Informationsverarbeitungsmodell nach Wickens und Hollands (2000) gestaltet. Dies macht es möglich, die Vorgänge von der Signalaufnahme bis zur Handlung zu beschreiben. Es können regelbasierte Vorgänge über das Gedächtnis sowie fertigkeitsbasierte Vorgänge nachvollzogen werden. Die Aufmerksamkeit lässt sich durch die Auswahl geeigneter Signale gezielt auf das Informations- bzw. Warnsystem lenken. Da ein Großteil der Aufmerksamkeitsressourcen bereits durch die Arbeitsaufgabe verbraucht wird, stellt dies einen der wichtigsten Sachverhalte dieser Arbeit dar.

Mehrere Faktoren wirken von außerhalb (aus der Umgebung) auf diese Systeme ein. Hier wirken sich z.B. Effekte durch die Arbeitsaufgaben aus, die die Interaktion mit dem Informations- bzw. Warnsystem erschweren können. Aber auch andere Arbeitsmittel und Arbeitsobjekte beeinflussen das Zusammenspiel. Zusätzlich wirken sich Umgebungseinflüsse wie z.B. das Wetter oder der Lärm von Maschinen als Störgrößen auf die Interaktion aus.

Das Modell schafft ein besseres Verständnis für die Zusammenhänge während der Informationsübertragung und deren Verarbeitung. Gleichzeitig werden alle wesentlichen Komponenten eines Informations- bzw. Warnsystems mit ihren Verknüpfungen aufgezeigt, um auch hier einen Überblick zu schaffen. Für die im nächsten Kapitel aufgestellten Forschungsfragen ermöglicht das Modell ein einfacheres Verständnis der Zusammenhänge.

### 3.2 Forschungsfragen

Die Forschungsfragen lassen sich drei Bereichen zuordnen, die gleichzeitig Schwerpunkte dieser Arbeit darstellen. Den ersten Bereich stellt die Erweckung der Aufmerksamkeit des Nutzers eines Informations- bzw. Warnsystems dar. Hier wurde bereits in Kapitel 2 deutlich, dass die Entwicklung von multimodalen Systemen notwendig ist, um eine redundante Signalübertragung zu gewährleisten. Hier müssen die entwickelten Konzepte auf ihre Eignung überprüft werden. Darüber hinaus soll die konzeptuelle Entwicklung des Informations- bzw. Warnsystems zwei Gefahrenmeldungen unterschiedlicher Bedeutung (Warnung und Alarm)

ermöglichen. Deswegen beschäftigt sich die zweite Forschungsfrage mit den Möglichkeiten, eine geeignete Unterscheidbarkeit der beiden Meldungen zu gewährleisten. Den dritten Bereich stellt die Rückmeldung des Nutzers an das System dar. Dieser Aspekt könnte gerade bei Informations- bzw. Warnsystemen in sicherheitskritischen Arbeitskontexten einen Sicherheitsgewinn bringen. Durch die Kenntnis der Nutzerintention kann individuell auf z.B. falsch verstandene Gefahrenmeldungen reagiert werden. Die Beurteilung des exemplarisch entwickelten Rückmeldungskonzeptes behandelt die dritte Forschungsfrage.

Im Folgenden sollen nun die drei Fragen einzeln vorgestellt und genauer erläutert werden.

### **1. Wie können multimodale Signale gestaltet werden, um in sicherheitskritischen Arbeitskontexten eine geeignete Entdeckbarkeit und Erkennbarkeit zu erreichen?**

Diese Forschungsfrage beschäftigt sich mit den Vorgängen des Entdeckens und Erkennens (vgl. einfaches Handlungsmodell in Kapitel 2.2.1) der menschlichen Informationsverarbeitung. Es geht darum, die Aufmerksamkeit des Nutzers zu erwecken und dabei ein deutlich erkennbares Signal zu übertragen. Im Modell sind hierfür die Signalgeber verantwortlich, die die Signale an den Menschen übertragen. Im Informationsverarbeitungsprozess des Menschen entscheiden die Phase des Entdeckens und die kognitiven Abläufe, ob das Signal als solches erkannt und weiterverarbeitet wird (Wogalter, 2006b).

Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden in Kapitel 3 Gestaltungshinweise und Konzepte erarbeitet. Zur Überprüfung müssen die nach den Konzepten erarbeiteten Signale sicher an den Nutzer übertragen werden können. Diese Betrachtung schließt auch mit ein, dass Signale nicht irrtümlich ohne das Vorhandensein einer Gefahrenmeldung erkannt werden (Velden, 1982).

Neben dem sicheren Entdecken der Signale ist auch die richtige Interpretation wichtig. Es muss klar erkennbar aus den Signalen hervorgehen, ob es sich um ein Warn- oder ein Alarmsignal handelt. Innerhalb der Arbeit kann die erste Interpretation der Signale nur über die Signalgeber zur Erweckung der Aufmerksamkeit erfolgen. In diesem Fall sind dies die LED-Brille und das Bone Conduction-Interface. Für diese beiden Signalgeber soll analysiert werden, ob eine Erkennung der Signale in dieser frühen Phase bereits möglich ist oder die Nutzer letztendlich zu zusätzlichen Informationen greifen müssen.

Die beiden Aspekte des Entdeckens und des Erkennens sollen über eine eingeschränkte Evaluation der umgesetzten Gestaltungslösungen (entwickelte Prototypen mit ihren Signalen) durch das in Kapitel 4 entwickelte Versuchskonzept überprüft werden.

## **2. Welche Maßnahmen verbessern die Unterscheidbarkeit von multimodalen Signalen in sicherheitskritischen Arbeitskontexten?**

Innerhalb der Arbeit werden Konzepte erarbeitet, die die Unterscheidung der beiden Signale „Warnung“ und „Alarm“ verbessern sollen. Zum einen ermöglichen spezifische Ausprägungen wie z.B. unterschiedliche Farben oder Tonhöhen eine klare Unterscheidung der Signale (DIN EN 981; Stapelkamp, 2009). Zum anderen wurden die Signale in ihrer Wirkung auf den Menschen unterschiedlich dringlich ausgeführt (Edworthy, Loxley, & Dennis, 1991). Diese beiden Maßnahmen sollen die kognitiven Verarbeitungsprozesse des Menschen unterstützen, die richtige Bedeutung der Signale zu ermitteln und damit bei der Auswahl einer geeigneten Reaktion auf das Signal zu helfen. Gleichzeitig dienen die Maßnahmen dazu, einer Verwechslung der Signale vorzubeugen.

Die erforderlichen Maßnahmen zur Verbesserung der Unterscheidbarkeit werden wie bei der vorherigen Forschungsfrage in Kapitel 3 entwickelt. Inwieweit die erarbeiteten Konzepte den Nutzer bei der Unterscheidung der Signale unterstützen, soll die eingeschränkte Evaluation der Prototypen und Signale zeigen. Da die Unterscheidbarkeit der Signale bei jedem Signalgeber gegeben sein muss, schließt die Betrachtung dieser Forschungsfrage alle Komponenten des Systems (LED-Brille, Bone Conduction-Interface und Display am Handgelenk) mit ein.

## **3. Wie kann eine Rückmeldung durch den Nutzer aussehen, die es ermöglicht herauszufinden, ob richtig zwischen den Signalen unterschieden wurde?**

Bei dieser Fragestellung gilt es, das Ergebnis der zweiten Forschungsfrage durch die Entwicklung eines geeigneten Interfaces zu prüfen. Das heißt, ob der Nutzer in der Lage ist, mit dem innerhalb dieser Arbeit entwickelten Rückmeldungsinterfaces richtig zwischen den beiden Signalen „Warnung“ und „Alarm“ zu unterscheiden. Dieses dient dazu, die Handlungsintention des Nutzers zu erfassen. Im Modell werden hier die letzten beiden Schritte des Informationsverarbeitungsprozesses betrachtet. Dies betrifft die Handlungsauswahl und die Handlung selbst. Darüber hinaus zeigt die Verbindung zwischen der Handlung und des Rückmeldungsinterfaces den Vorgang der Rückmeldung an das Informations- bzw. Warnsystem.

Untersucht werden sollen die Bedienbarkeit des Rückmeldungskonzeptes während der individuellen Eingabe in Folge der Gefahrenmeldungen „Alarm“ und „Warnung“. Zum Einsatz kommt hierbei das Display am Handgelenk mit Touchscreen, auf dem die Eingaben über Gesten durchgeführt werden. Da es sich noch um ein sehr prototypisches Stadium handelt, soll innerhalb dieser Arbeit erst einmal eine Aussage über die generelle Eignung eines solchen Konzeptes getroffen werden.



### 3.3 Gestaltungshinweise zur Erweckung der Aufmerksamkeit

Nachdem die Forschungsfragen im vorherigen Kapitel beschrieben wurden, soll dieses Kapitel Gestaltungshinweise liefern, um die ersten beiden Fragen berücksichtigen zu können. Dazu werden Maßnahmen beschrieben, die die Konzepte besser entdeck- und erkennbar gestalten. Außerdem wird berücksichtigt, die Signale gleichzeitig unterscheidbar gestalten zu können. Dies schließt auch die Betrachtung der Dringlichkeit mit ein.

Untergliedert ist das Kapitel in Gestaltungshinweise zur visuellen (vgl. Kapitel 3.3.1), akustischen (vgl. Kapitel 3.3.2) und taktilen (vgl. Kapitel 3.3.3) Darbietung der Signale.

#### 3.3.1 Visuelle Signaldarbietung

Bei der visuellen Signaldarbietung muss stets berücksichtigt werden, dass über den visuellen Kanal des Menschen die meisten Informationen zu erfassen sind. Hier ist es besonders wichtig, möglichst viele der Gestaltungsparameter für die Entwicklung von Konzepten zu berücksichtigen, um ein möglichst einfaches und schnelles Entdecken, Erkennen und Unterscheiden zu ermöglichen.

Gestaltungshinweise sollen zu den Bereichen Positionierung des Signalgebers (vgl. Kapitel 3.3.1.1), Farbauswahl (vgl. Kapitel 3.3.1.2), Positionskodierung der Signale (vgl. Kapitel 3.3.1.3), Signalkodierung über Blinkeffekte (vgl. Kapitel 3.3.1.4) und adaptive Regelung der Leuchtstärke visueller Signale (vgl. Kapitel 3.3.1.5) erfolgen.

##### 3.3.1.1 Positionierung des Signalgebers

Die Wahrnehmung visueller Signale hängt hauptsächlich von ihrer Platzierung im Gesichtsfeld des Menschen ab. Wie in Kapitel 2.2.2.3 beschrieben, existiert im Zusammenhang mit visuellen Gefahrmeldungen die Norm DIN EN 842, die den geforderten Bereich im Gesichtsfeld des Menschen benennt.

Eine Übertragung der in DIN EN 842 geforderten Bereiche für eine akzeptable Wahrnehmbarkeit der Signalgeber lässt für ein individuelles Informations- bzw. Warnsystem zwei Gestaltungsoptionen zu.

1. Die Signalgeber werden an einem fixen Punkt im geforderten Gesichtsfeld positioniert und folgen damit der Kopfbewegung. Die Umsetzungen dieser Gestaltungsoption kann z.B. durch spezielle Brillen oder Gestelle vorm Auge realisiert werden. Auch eine zukünftige Integration in spezielle aktive Kontaktlinsen im Auge wäre eine Möglichkeit. Durch die Positionierung der Signalgeber so nahe am Auge muss mit einer

Blendungswirkung gerechnet werden. Eine Umsetzung dieser Variante wird in Kapitel 3.6.2.2 diskutiert.

Signalgeber in einem größeren Abstand zum Auge zu positionieren, scheitert an den innerhalb dieser Arbeit betrachteten sicherheitskritischen Arbeitsfeldern, bei denen die betreffenden Personen stets an verschiedenen Orten beschäftigt sind. Die Signalgeber würden in diesem Fall stark die Bewegungsmöglichkeiten der Personen einschränken und sind damit nicht praktikabel.

2. Die Signalgeber werden nicht an einem fixen Punkt im Gesichtsfeld eingesetzt. Bei der Umsetzung ergibt sich eine Reihe von Problemen. Es ist nicht gewährleistet, dass sich zu jedem Zeitpunkt der visuelle Reiz im noch akzeptablen Gesichtsfeld befindet. Dadurch ist in jedem Fall eine Redundanz (z.B. ein zusätzliches akustisches Signal) vorzusehen.

Eine Variante besteht darin, die visuellen Signalgeber gleichmäßig in der Umgebung oder bei der Arbeit in Gruppen an anderen Personen der Gruppe vorzusehen. Dies steht im Widerspruch zu einem individuellen Informations- bzw. Warnsystem, das in kleinen Gruppen oder für Einzelpersonen einsetzbar wäre, weil hier eine sichere Wahrnehmung gefährdet ist. Um der schlechteren Wahrnehmbarkeit der Signale entgegenzuwirken, müssten diese intensiver z.B. heller gestaltet werden. So besteht die Gefahr der Blendung, was die Orientierung in Gefahrensituationen erschweren kann.

Die Anbringung der Signalgeber am eigenen Körper müsste, wie zuvor schon diskutiert, redundant ausgeführt werden und es können Blendungseffekte auftreten. Die Umsetzung dieser Variante wird in Kapitel 3.6.2.2 diskutiert.

### **3.3.1.2 Farbauswahl**

Die farbliche Kodierung von unterschiedlichen Zuständen, auch Gefahrenzuständen, stellt eine sehr effiziente Methode dar, den Benutzer beim Ablesen von Informations- bzw. Warnsystemen zu unterstützen (Schmidt, Schlick, & Grosche, 2008; Stapelkamp, 2009). DIN EN 981 gibt Auskunft über die Verwendung von Farben bei visuellen Signalen.

Tabelle 3 Schema der Farben visueller Signale (DIN EN 981)

Farbe	Bedeutung	Zweck	Bemerkungen
ROT	Gefahr Anomaler Zustand	Notfall Alarm Halt Verbot Ausfall	Rote Lichtblitze müssen für NOT-EVAKUIERUNG verwendet werden
GELB	Vorsicht	Aufmerksamkeit erforderlich Zustandsänderung Eingriff	—
BLAU	Anzeige der Notwendigkeit zwingend vorgeschriebenen Handelns (siehe EN 60073)	Handlung Schutz Besondere Aufmerksamkeit Sicherheitsrelevante Regelung oder Vorkehrung mit Priorität	Für Zwecke, die mit Rot, Gelb oder Grün nicht eindeutig zu beschreiben sind.
GRÜN	Alles klar Normalzustand	Zum normalen Ablauf zurückkehren Weitermachen	Zur Überwachung eingeschalteter Geräte (normal).

Tabelle 3 stellt einen Auszug aus dieser Norm dar. Sie gibt eine Übersicht zu den relevanten Farben in Verbindung mit Informations- bzw. Warnsystemen. Die Farbe Rot steht für einen Gefahrenzustand (DIN EN ISO 9241-303; Stapelkamp, 2010; Van Cott & Kinkade, 1972), auf den dringend eine Reaktion erforderlich ist. Aus diesem Grund soll Rot für das Signal der Alarmierung eingesetzt werden (DIN EN 842).

Gelb wird die Bedeutung „Vorsicht“ zugewiesen und eignet sich dadurch für das Signal der Warnung (DIN EN 842). Das Signal soll die Aufmerksamkeit auf ein nahendes Ereignis lenken (im Fall des Beispiels Gleisbau auf einen nahenden Zug auf dem Nachbargleis). Es ist mehr ein hinweisendes Signal, das für viele Zustandsänderungen eingesetzt werden kann. Eine Reaktion auf das Signal ist von der Situation abhängig und nicht zwangsweise nötig.

Nach Stapelkamp (2007) werden Farben interkulturell verschiedene Bedeutungen zugewiesen. Für die Farben Rot und Gelb kann die Bedeutung auch nicht in allen Regionen auf eine vorliegende Gefahr festgelegt werden. Vielmehr stehen die Farben ebenso für „Glück“. Dies macht deutlich, dass von einer rein intuitiven Deutung der Signale anhand der Farben nicht ausgegangen werden kann. Ist die Bedeutung jedoch bekannt, unterstützt das Vorhandensein der Farbe bei der schnelleren Erkennung (Wogalter & Cox III, 2006) und beugt Verwechslungen vor.

Ein wichtiger Punkt, der bei der Auswahl von Farben nicht außer Acht gelassen werden darf, ist eine Farbfehlsichtigkeit (VDI/VDE 3850 Blatt 1), die bei immerhin 8% der männlichen Bevölkerung auftritt (Stapelkamp, 2007). Aufgrund der Farbfehlsichtigkeit können die Farben durch die betreffenden Personen verändert wahrgenommen werden.

Um trotzdem eine Aussage über die Unterscheidbarkeit treffen zu können, kann der Farbabstand  $\Delta L_{uv}$  (vgl. Formel 1) im  $L_{uv}$  Farbraum berechnet werden (Lindbloom, 2003). Der Farbabstand beschreibt den geometrischen Abstand zwischen zwei Farben im jeweiligen dreidimensionalen Farbraum.

$$\Delta L_{uv} = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta u^2 + \Delta v^2} \text{ Formel 1}$$

L beschreibt dabei die Helligkeitsachse und u und v spannen die Farbartebene auf. Farben in RGB Koordinaten lassen sich über einen Zwischenschritt im XYZ Farbraum in  $L_{uv}$  Koordinaten überführen.

Der  $L_{uv}$  Farbraum zeichnet sich dadurch aus, dass er an die menschliche Wahrnehmung angepasst ist und somit gute Aussagen über die wirklich wahrgenommenen Farben liefert. Er eignet sich besonders für selbstleuchtende Medien wie zum Beispiel Monitore. Farben mit einem Farbabstandswert  $\Delta L_{uv}$  von größer als 20 (DIN EN ISO 9241-303) können voneinander unterschieden werden.

**Tabelle 4 Farbabstandsrechnung im Luv Farbraum**

Farbe		RGB Anteile			Farbe	Farbabstand $\Delta L_{uv}$				
		R	G	B						
Rot		255	0	0		0	186,2	163,0	168,8	177,9
Gelb		255	255	0		186,2	0	61,4	31,5	105,4
Protanopes Rot		120	100	25		163,0	61,4	0	31,0	59,1
Deutanopes Rot		165	145	5		168,8	31,5	31,0	0	83,0
Tritanopes Gelb		255	230	230		177,9	105,4	59,1	83,0	0

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse aus der Berechnung der Farbabstände im  $L_{uv}$  Farbraum. Dabei werden zunächst die verwendeten Farben anhand ihrer RGB-Anteile dargestellt. Es wird näherungsweise von einem reinen Rot und einem reinen Gelb ausgegangen, die über die visuellen Signalgeber dargestellten Farben werden davon abweichen. Darüber hinaus sollen auch die Farben berücksichtigt werden, die aus einer Farbfehlsichtigkeit hervorgehen. Aus der Rot-Grün-Sehschwäche (Protanopie oder Deutanopie) geht das protanope Rot und das deutanope Rot hervor, das trianope Gelb resultiert aus der seltenen Gelb-Blau-Blindheit (Tritanopie).

Die Ergebnisse der Farbabstandsrechnung ergeben  $\Delta L_{uv}$ -Werte von größer 20 und können somit voneinander unterschieden werden (DIN EN ISO 9241-303). Auch Personen mit Farbfehlsichtigkeiten sollten keine Probleme mit der Unterscheidung bekommen. Sollte es nötig sein, zusätzliche Signale einzusetzen, bieten die Farben Blau oder Grün eine Möglichkeit der Erweiterung. Auch dann ist es empfehlenswert, nach dem hier beschriebenen Vorgehen eine Vorabanalyse der Farben vorzunehmen. Die endgültige Eignung der Signale sollte trotzdem immer durch Nutzerstudien abgesichert werden (Wogalter & Vigilante, 2006).

Um trotzdem Verwechslungen zwischen den Farben vorzubeugen, sollten die Signale zusätzlich positionskodiert werden. Mit diesem Sachverhalt beschäftigt sich das folgende Kapitel.

### **3.3.1.3 Positionskodierung der Signale**

Die Positionskodierung von unterschiedlichen Signalen wirkt der Verwechslungsgefahr entgegen (DIN EN 842; VDI/VDE 3850 Blatt 1; Van Cott & Kinkade, 1972). Einfachstes Beispiel in diesem Zusammenhang stellt eine Verkehrsampel dar, die zwar die Farben Rot, Gelb und Grün enthält, aber durch die feste Anordnung der Farb- bzw. Leuchtpositionen der Lampen redundant in ihrer Ablesbarkeit bleibt. Dadurch ist es auch komplett farbenblinden Personen möglich, eine Ampel abzulesen.

Um diesen Effekt bei Informations- bzw. Warnsystemen zu nutzen, müssen auch hier die verschiedenen Signale an unterschiedlichen, aber bewusst wiedererkennbaren Positionen erscheinen. Wie in Kapitel 2.2.2.3 beschrieben, sollten die visuellen Signale dabei im von DIN EN 842 geforderten akzeptablen Bereich der Wahrnehmbarkeit dargeboten werden. Auch für diesen Bereich sollte beachtet werden, dass der Mensch gewöhnlich seinen Blick leicht nach unten gesenkt hält. Vergleichbar mit der Positionierung eines Buches beim entspannten Lesen, versucht der Mensch so eine entspannte Blickrichtung der Augen einzunehmen (DIN EN ISO 9241-302). Wichtige Signale sollten daher in Bereichen liegen, zu denen häufige Blickzuwendungen vorliegen. Diese können je nach Einsatzgebiet stark voneinander abweichen.

Innerhalb dieser Arbeit werden die dringlichen Signale unterhalb der horizontalen Blickrichtung dargestellt und die warnenden oder hinweisenden Signale oberhalb. Durch diese Zweiteilung der Signale soll eine klare Unterscheidbarkeit gewährleistet werden. Für zusätzliche Signale könnten z.B. die seitlichen Bereiche des Gesichtsfeldes genutzt werden, wobei dort die Wahrnehmbarkeit je nach Blickrichtung stark abnehmen kann. Auch hier sind Nutzerstudien für die endgültige Absicherung der Signale und Signalgeber unabdingbar (Wogalter & Vigilante, 2006).

### **3.3.1.4 Signalkodierung über Blinkeffekte**

Blinkeffekte sind eine wirkungsvolle Möglichkeit, die Aufmerksamkeit auf das jeweilige Signal zu lenken (DIN EN 842; VDI/VDE 3850 Blatt 1; Bliss & Fallon, 2006; Crawford, 1963; Van Cott & Kinkade, 1972). Entscheidend dabei ist vor allem die Frequenz. Je nach Anwendungsfeld sollte die Blinkfrequenz nicht zu niedrig sein, sonst besteht die Gefahr, das Signal zu übersehen (Wogalter & Vigilante, 2006). Maximal wird eine Frequenz von 3 Hz empfohlen. Um die Erkennbarkeit nicht zu gefährden, sollten maximal zwei verschiedene Blinksignale genutzt werden (VDI/VDE 3850 Blatt 1).

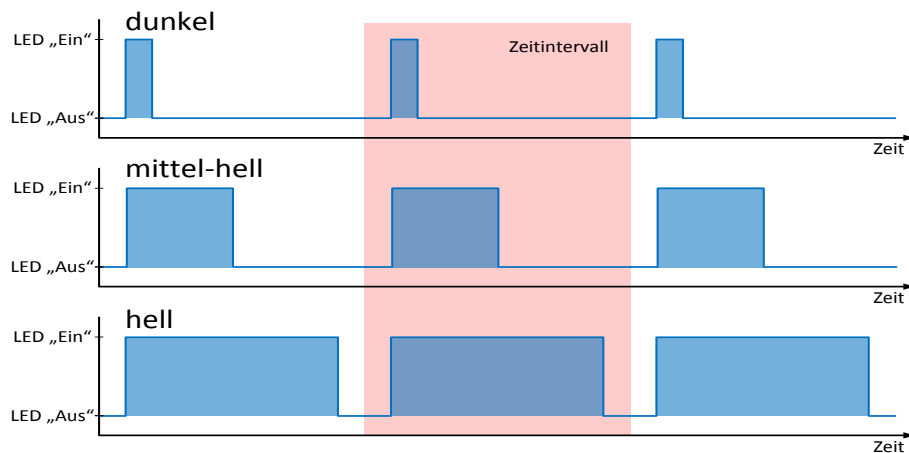
Auch die Dringlichkeit eines Signals lässt sich durch die Frequenz des Blinkens ausdrücken. Langsamere Frequenzen eignen sich für weniger dringliche Situationen, höhere Frequenzen sollten für dringliche Situationen genutzt werden. Die VDI/VDE 3850 Blatt 1 empfiehlt Blinkfrequenzen zwischen 1 Hz und 3 Hz, wobei ein Tastverhältnis von 50% (Ein zu Aus) vorzusehen ist. Allerdings können auch Frequenzen bis 0,5 Hz für weniger dringliche Signale genutzt werden (Früh & Ahrens, 2009; Zühlke, 2012). Frequenzen über 3 Hz sollten gemieden werden, da diese für Personen mit Foto-sensitiver Epilepsie gefährlich werden können (DIN EN ISO 9241-303).

Auch die Leuchtdichte darf nicht zu hoch vorgesehen werden, um die Bildung von Nachbildern zu verhindern (DIN EN 894-2). Mit diesem Aspekt der situationsangepassten Regelung beschäftigt sich das folgende Kapitel.

### **3.3.1.5 Adaptive Regelung der Leuchtstärke visueller Signale**

Innerhalb dieser Arbeit sollen die visuellen Signale zur Erweckung der Aufmerksamkeit mittels LEDs gelöst werden. Die Entwicklung von LEDs ist in den letzten Jahren stark vorangegangen. Mittlerweile sind sie in nahezu allen vorstellbaren Anwendungsgebieten vertreten. LEDs sind besonders energiesparend, langlebig und robust. Dies macht die LED auch zu einer geeigneten Licht- oder Signalquelle in sicherheitskritischen Arbeitskontexten (Neudörfer, 2013).

Wie zuvor geschrieben, sollen die Versuchsträger des entwickelten Informations- und Warnsystems ebenfalls LEDs nutzen. Leider können LEDs nicht so einfach wie Glühlampen in ihrer Helligkeit geregelt werden. Die Adaption auf unterschiedliche Umgebungshelligkeiten ist aber notwendig, um z.B. Blendungen zu vermeiden (Van Cott & Kinkade, 1972). Dieses Problem kann durch Verwendung der Pulsweitenmodulation (PWM) gelöst werden. Die Funktionsweise dieses Verfahrens wird in Abbildung 26 veranschaulicht.



**Abbildung 26 Einstellung der Signalhelligkeit durch Pulsweitenmodulation**

LEDs haben die Besonderheit, dass sie sehr schnell an- und ausgeschaltet werden können. Die PWM-Steuerung aktiviert die LED in sehr hohen Frequenzen (im kHz-Bereich). Bei solchen Frequenzen nimmt das menschliche Auge die LED als konstant leuchtend wahr (Wogalter & Vigilante, 2006), selbst ein Flimmern bei schnellen Bewegungen ist nicht wahrnehmbar. Werden nun die „An-Zeiten“ zu den „Aus-Zeiten“ in den sehr kurzen Zeitintervallen variiert, nimmt das menschliche Auge unterschiedliche Helligkeiten wahr (vgl. Abbildung 26). So können LEDs stufenlos gedimmt werden.

Als Eingang erhält die PWM einen Eingangswert, der dann in eine Pulsfolge umgewandelt wird. Leider ist es nicht möglich, diesen Wert einfach über einen Sensor zu beziehen, da der gemessene Wert zuerst an die menschliche Wahrnehmung angepasst werden muss.

Stevens (1957) stellte seinerzeit eine Potenzfunktion zur Helligkeitswahrnehmung des menschlichen Auges auf. Diese kann genutzt werden, die Sensorwerte der gemessenen Umgebungshelligkeit in Eingangsparameter für die PWM umzurechnen. So ist es möglich, an die Umgebungshelligkeit angepasste Signale an das Auge zu übermitteln. Blendung bzw. die Bildung von Nachbildern (DIN EN 894-2) kann so vermieden werden.

Das hier vorgestellte Verfahren wurde verwendet, um die Versuchsträger an die Bedingungen während der Versuche anzupassen. Für eine Verwendung unter Realbedingungen werden weitere Maßnahmen nötig sein, die z.B. schon im Voraus eine übermäßige Sonneneinstrahlung am Auge reduzieren. Die LEDs können nicht unbegrenzt hell eingestellt werden, da es sonst zu Netzhautschädigungen im Auge kommt. Diese weiteren Maßnahmen wurden im Umfang dieser Arbeit nicht berücksichtigt, um die Einflussfaktoren auf die späteren Studien kontrollierbar zu halten.

### **3.3.2 Akustische Signaldarbietung**

Die Vorgehensweise für die akustische Signaldarbietung verläuft analog der Vorgehensweise im visuellen Bereich.

In diesem Kapitel erfolgen Gestaltungshinweise zu den Parametern: Übertragungsweg der Signale (vgl. Kapitel 3.3.2.1), Wahrnehmbarkeit der Signale (vgl. Kapitel 3.3.2.2), Unterscheidbarkeit der Signale (vgl. Kapitel 3.3.2.3) und Dringlichkeit der Signale (vgl. Kapitel 3.3.2.4).

#### **3.3.2.1 Übertragungsweg der Signale**

Die Darbietungsart beschreibt den Weg, über welchen die Übertragung der akustischen Signale an die betreffenden Personen erfolgen soll. Da der Ausgangspunkt dieser Arbeit die Entwicklung eines individuellen Informations- bzw. Warnsystems ist, stehen stationäre Signalgeber nicht zur Debatte.

Für ein individuelles (personengebundenes) System stehen unterschiedliche Möglichkeiten der Signalübertragung zur Verfügung. Die Signale können auf dem herkömmlichen Weg über die Luftleitung oder durch Einsatz eines vibro-taktilen Bone Conduction-Signalgebers übertragen werden. Eine kurze Bewertung beider Übertragungsarten soll anschließend stattfinden.

##### **Luftleitung:**

Die Signalübertragung über Luftleitung (vgl. Kapitel 2.2.3) kann im Normalfall mehrere Personen gleichzeitig erreichen. Dies kann im Falle einer Information bzw. Warnung, die an mehrere Personen gerichtet ist, von Vorteil sein. Sollen aber individuelle Signale verbreitet werden, kann dies zur Verwirrung von nicht betroffenen Personen führen. Außerdem stört dies, da auch bei nicht betroffenen Personen Aufmerksamkeit von der Arbeitsaufgabe abgezogen wird (Malter & Guski, 2001).

Sollen trotzdem zielgerichtet akustische Signale übermittelt werden, bleibt nur noch die Möglichkeit, die Übertragung so zu gestalten, dass diese nur die betreffende Person wahrnimmt. Zu diesem Zweck eignen sich Kopfhörersysteme oder Inear-Systeme. Beide Systeme sind in vielfältiger Ausführungsform auf dem Markt erhältlich. Großer Nachteil dieser Systeme ist die schlechte Erreichbarkeit der betroffenen Personen beim Tragen. Da das Ohr verdeckt (Kopfhörer) bzw. verschlossen (Inear-Systeme) wird, ist eine einfache Kommunikation mit anderen Personen erschwert. Die Nutzung nur eines Ohres verbessert zwar die Wahrnehmung der Umgebung, erschwert aber auch die sichere Übermittlung der Informations- bzw. Warnsignale.



Ein weiteres Problem stellen extrem laute Baustellen dar. Hier ist es Pflicht, Gehörschutz zu tragen und moderne Systeme machen es sogar möglich, über Sprechfunk zu kommunizieren. Auch hier wäre die Kombination mit einem Informations- bzw. Warnsystem keine große Herausforderung. Allerdings ist es den betroffenen Personen nicht zuzumuten, in leisen Phasen trotzdem den Gehörschutz zu tragen. Also müsste hier auf zwei Systeme zurückgegriffen werden. Das birgt allerdings die Gefahr der sicherheitswidrigen Unterlassung bzw. des Vergessens, das zweite System wieder anzulegen. Ein letzter Punkt ist die Hygiene, die auch bei der täglichen Nutzung solcher Systeme gewährleistet werden müsste.

Die genannten Punkte stellen Probleme dar, die bei der Gestaltung neuer Systeme auftreten können. Je nach Nutzungskontext finden sich sicherlich Lösungen, um diese Systeme einsetzen zu können, allerdings existiert noch eine weitere Übertragungsart, die nun erläutert werden soll.

### **Bone Conduction:**

Die Signalübertragung über Bone Conduction (vgl. Kapitel 2.2.3) kann zu den individuellen Methoden gezählt werden. Durch den Einsatz eines Signalgebers direkt am Kopf der betreffenden Person, kann nur die Person selbst die übermittelten Signale wahrnehmen. Die Übertragungsart kann mit dem Einsatz von Kopfhörern oder Inear-Systemen verglichen werden. Der Vorteil besteht darin, dass kein Verschließen der Ohren stattfindet und so die normale Schallübertragung über den Luftschall zusätzlich stattfindet. Die betroffenen Personen sind nicht isoliert und können ganz herkömmlich mit ihrer Umwelt interagieren. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Signalgeber in Helm, Brille oder Gehörschutz zu integrieren. Auch dann besteht wieder das Problem, dass die Komponenten dauerhaft getragen werden müssen (Schultheis et al., 2012). Zusätzlich muss zur erfolgreichen Übertragung der Signale gewährleistet werden, dass die Signalgeber mit der erforderlichen Anpresskraft am Schädelknochen anliegen. Die geeigneten Positionen am Kopf des Menschen wurden bereits in Kapitel 2.2.3 benannt. Bei der Entwicklung einer Aufnahme für die Signalgeber oder der Integration in die PSA kann auf diese bereits erprobten Positionen zurückgegriffen werden (McBride et al., 2005).

Ein Problem stellt die Qualität der Übertragung dar, die Wiedergabe von tiefen Tönen erfolgt nicht so gut wie die von hohen Tönen. Ebenso erfolgt die Übertragung gedämpfter als bei der Luftleitung (Henry & Letowski, 2007). Daher ist mit einer Reduzierung der Lautstärke zu rechnen. Diese beiden Effekte müssen bei der Auslegung von Signalen berücksichtigt werden.

### 3.3.2.2 Wahrnehmbarkeit der Signale

Die Wahrnehmbarkeit akustischer Signale hängt enorm von den Umgebungsbedingungen ab. Aus diesem Grund sollten die genutzten Signale immer im Vorfeld auf die jeweiligen Bedingungen abgestimmt werden (Haas & Edworthy, 2006).

Generell liefern die Normen gute Anhaltspunkte bei der Gestaltung von Signalen. Für eine gute Hörbarkeit sollten die Signale nicht leiser als mit einer Lautstärke von 65 dB (A) von der betreffenden Person wahrgenommen werden. Dabei ist auch der Störschallpegel zu berücksichtigen, diesen müssen die Signale um mindestens 15 dB (A) überschreiten (DIN EN ISO 7731). Darüber hinaus empfiehlt die Norm bei Störschallpegeln über 100 dB (A) die zusätzliche Nutzung von optischen Signalen. Handelt es sich bei den Signalen um keine Gefahrensignale, muss der Störschallpegel um min. 5 dB (A) überschritten werden, jedoch nicht um mehr als 10 dB (A) (DIN EN 894-2).

Zu laute Signale führen zu einer Anhebung der Hörschwelle und können zu dauerhaften Schäden führen, daher wird eine obere Schallpegelgrenze von 90 dB (A) empfohlen (Malter & Guski, 2001; Neudörfer, 2013). Auch ein zu schneller Anstieg eines Signals wirkt sich nachteilig aus (z.B. mehr als 30 dB (A) in 0,5 s), es kann zu Schreckreaktionen kommen (Malter & Guski, 2001).

Einen wichtigen Gestaltungshinweis liefert zusätzlich DIN EN ISO 7731 zu pulsierenden Signalen. Derart ausgeführte Signale können leichter wahrgenommen werden als konstante. Die Pulsfrequenzen sollten zwischen 0,5 Hz und 4 Hz liegen und sich deutlich von evtl. Frequenzen im Störschall unterscheiden.

Die für die Signale verwendeten Frequenzen sollten zwischen 500 Hz und 3000 Hz liegen, da dort das menschliche Gehör am empfindlichsten ist (DIN EN 894-2). Personen mit Lärm- oder Altersschwerhörigkeit sollten keine Signale mit Frequenzen über 2000 Hz übermittelt werden. Auch Gehörschutz wirkt sich bei höheren Frequenzen negativ auf die Wahrnehmbarkeit der Signale aus, hier müssen die Signale ausreichend laut übermittelt werden (DIN EN ISO 7731). Bei der Auswahl der Signalfrequenzen ist es notwendig, im Vorfeld eine Analyse der Umgebungsgeräusche, aber auch der zu erwarteten Arbeitsmaschinen vorzunehmen. Die akustischen Signale sollten so gestaltet werden, dass sie nicht von anderen Geräuschen überdeckt werden (vgl. Abbildung 27) (Neudörfer, 2013). Damit sollten die Signale ein möglichst breites Frequenzspektrum abdecken. Patterson und Mayfield (1990) sprechen von mindestens vier spektralen Komponenten, die um 15 dB (A) oberhalb der Mithörschwellen liegen sollen.

Signale aus mehreren Komponenten sind schwieriger zu interpretieren als einfache Signale, die nur aus einem Ton oder einer Folge des einen Tons bestehen (Haas & Edworthy, 2006). Gleichzeitig können mehrere Töne leichter wahrgenommen bzw. können nicht so leicht von anderen Geräuschen überdeckt werden. Zusätzlich steigt bei Signalen aus mehreren Frequenzen die Unterscheidbarkeit von anderen Signalen, womit sich das folgende Kapitel 3.3.2.3 beschäftigt.

### 3.3.2.3 Unterscheidbarkeit der Signale

In diesem Kapitel sollen Maßnahmen aufgezeigt werden, um die Unterscheidbarkeit von akustischen Signalen zu verbessern. Laut Neudörfer (2013) fällt die Unterscheidung von Signalen einfacher, wenn mindestens

zwei akustische Parameter voneinander variieren. Unter akustische Parameter fallen z.B. Unterschiede im Frequenzspektrum, im zeitlichen Verlauf oder der Schalldruckpegel.

Darüber hinaus gibt die Literatur viele Möglichkeiten der Gestaltung von akustischen Signalen vor. Eine gute Zusammenfassung der wichtigsten Vorgehensweisen liefern Malter und Guski (2001) in ihrem Forschungsbericht.

DIN EN 981 liefert ein Vorgehen für die Gestaltung von Informations- und Gefahrensignalen. Diese sind in Kategorien geordnet, die von einer Gefahrenmeldung mit hoher Dringlichkeit bis zur einfachen Information gut unterscheidbar gestaltet wurden.

Patterson (1982) beschreibt ein Signal, das sich aus verschiedenen Impulsen zusammensetzt (vgl. Abbildung 28). Dieser Grundimpuls besitzt ein kurzes Onset und Offset. Die Zusammenstellung des Impulses kann aus verschiedenen Frequenzen entstehen, die zusammen einen Ton erzeugen. Aus den Impulsen werden sogenannte „Bursts“ gestaltet. Damit es zu keiner Schreckreaktion kommt, sind die ersten Impulse weniger stark ausgeprägt. „Bursts“ stellen das eigentliche Warnsignal dar und wiederholen sich in zeitlichen Abständen.

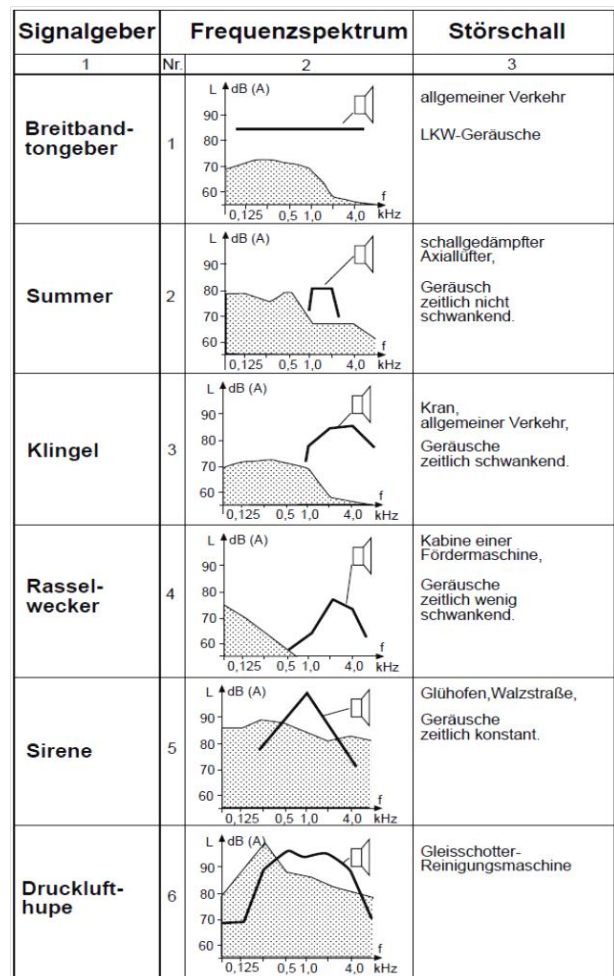


Abbildung 27 Akustische Signalgeber und deren Einsatz (Neudörfer, 2013)

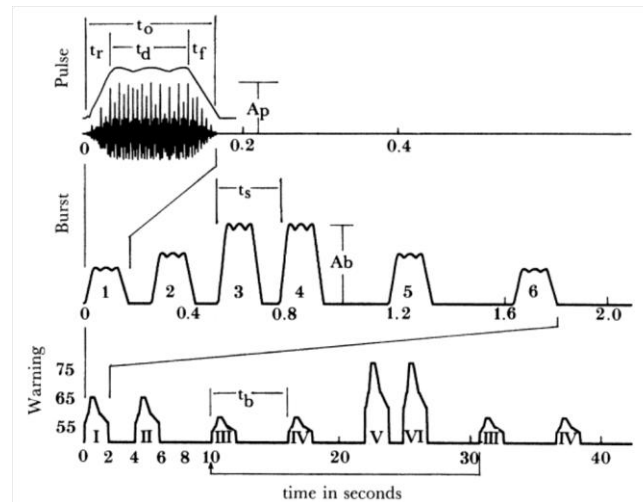


Abbildung 28 Warnungsdesign (nach Patterson, 1982)

Durch dieses Vorgehen können komplexere Signale erzeugt werden. Verwendung fanden diese Signale erstmals in Verkehrsflugzeugen, hier werden den Signalen bestimmte Bedeutungen zugewiesen. Das Verständnis der vielfältigen Signale ist durch den Einsatz von Schulungen sicherzustellen. Ein intuitiver Einsatz der Signale ohne ständige Nachschulungen muss noch geprüft werden.

Stanford et al. (1985; 1988) entwickelten ein weiteres Vorgehen. Dieses setzt sich wie bei Patterson aus einer Reihe von Grundimpulsen zusammen, aus denen die eigentlichen Signale aufgebaut werden können (Stanford, McIntyre, & Hogan, 1985; Stanford, McIntyre, Nelson, & Hogan, 1988). Einsatz finden diese Signale im Bereich der Anästhesie, allerdings finden auch in diesem Bereich Schulungen zu den eingesetzten Geräten statt. Die betreffenden Personen sind es gewohnt, mit komplexen Signalen umzugehen.

Die hier dargestellten Vorgehen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie stellen systematische Verfahren dar und sind für die Gestaltung von Gefahrensignalen geeignet (Malter & Guski, 2001). Nach dem hier beschriebenen Vorgehen ist es möglich, Signale nicht nur hinsichtlich ihrer Bedeutung, sondern auch hinsichtlich ihrer Dringlichkeit zu gestalten. Dies soll im nun folgenden Kapitel beschrieben werden.

### 3.3.2.4 Dringlichkeit der Signale

In sicherheitskritischen Arbeitskontexten sind es die betroffenen Personen gewohnt, mit Gefahren umzugehen. Aus diesem Grund ist es von besonderer Wichtigkeit, ein Bewusstsein für die Dringlichkeit der Situation zu schaffen (Edworthy et al., 1991). Akustische Signale sind in diesem Zusammenhang besonders geeignet, diese Information zu übermitteln, da in vielen

Anwendungsfällen ein akustisches Signal parallel zur eigentlichen Bearbeitung der Arbeitsaufgabe wahrgenommen werden kann.

Die Normen DIN EN 894-2 und DIN EN 981 liefern bereits erste Anhaltspunkte zur Gestaltung der Dringlichkeit in akustischen Signalen. Eine übersichtliche Zusammenstellung an Maßnahmen verschiedener Autoren zur Dringlichkeitsgestaltung liefert Malter und Guski (2001) (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5 Gestaltung der Dringlichkeit (Malter & Guski, 2001)

Autor	Momtahan	Edworthy	Haas/Casali	Patterson
Dauer des Grundimpulses (msec)	100 > 250 > 500	200 konstant einschl. 20 ms Onset & Offset	350 einschl. 25 ms Onset & Offset	
Intervall zw Grundimpulsen (ms)	100 > 250 > 500	schnell > gemäßigt > langsam	0 > 150 > 300	
Amplitudenverlauf (ms)	Anstieg: 25 > 100, 200 Abfall: 25 > 100, 200	gleichmäßig / langsamer Onset > langsamer Offset		
Inharmonische		Zufall / 10 % unregelmäßig > 50 % unregelmäßig > regelmäßig		Inharmonische > regelmäßig
Verzögerte Harmonische		keine verzögerten > verzögerte		
Pegel Grundimpuls			79 > 65 dBC	
Anzahl Harmonische	$f_0 + 11$ Harm. > $f_0 + 7$ Harm. > $f_0 + 3$ Harm. > nur $f_0$			
Spektraler Verlauf	Energie gleichförmig auf Harmonische verteilt / Verteilung im unteren oder oberen Frequenzbereich > Rest			Energie konzentriert auf höhere Harmonische > Energie konzentriert auf untere Harmonische
Grundfrequenz (Hz)	1000 > 660 > 500 > 330 > 143	hoch > niedrig		
Frequenzmodulation (Hz)	keine FM > 4, 8, 16			
Amplitudenmodulation (Hz)	keine AM > 4, 8, 16			
Frequenzverläufe (Hz)	keine Änderungen > als irgendwelche Änderungen (außer bei ansteigenden Frequenzen)			
Änderungen d. Grundfrequenz (Hz)	375 > alle anderen Änderungen (350-375-350; 350-375-400-375-350; 375-350-375; 400-375-350-375-400)			

> wirkt dringlicher als

/ wirkt gleich dringlich

So kann, egal nach welchem Vorgehen aus Kapitel 3.3.2.3 die Signale gestaltet wurden, die Dringlichkeit individuell angepasst werden. Dies ist besonders wichtig, da die unterschiedlichen Signale auch an die ausgewählten Signalgeber anzupassen sind.

Die innerhalb dieser Arbeit verwendeten Signale und Signalgeber sollen im folgenden Kapitel 3.6.2.4 vorgestellt werden.

### **3.3.3 Taktile Signaldarbietung**

Nach dem Visuellen und dem Akustischen soll nun näher auf Hinweise zur Gestaltung taktiler Signalgeber und Signale eingegangen werden. Diese sollen anhand von zwei Übertragungswegen analysiert werden, zum einen über die Einwirkung von mechanischen Schwingungen und zum anderen über die Einwirkung von thermischen Reizen.

Zur Signalübertragung über thermische Reize bestehen allerdings nur wenige Vorkenntnisse, deshalb läuft hier die Vorgehensweise grundlagenbasierend ab. So wurde für die thermische Signalübertragung letztendlich auf die Gestaltung zweier spezifischer Signale für Alarmierung und Warnung verzichtet, um zuerst Erkenntnisse zu einem Signalgeber zu sammeln. Die Signaldarbietung über mechanische Schwingungen ist hingegen kein neues Feld und kann deshalb etwas konkreter behandelt werden. Hier werden Gestaltungslösungen aus anderen Forschungsunternehmungen in das Vorgehen miteinbezogen.

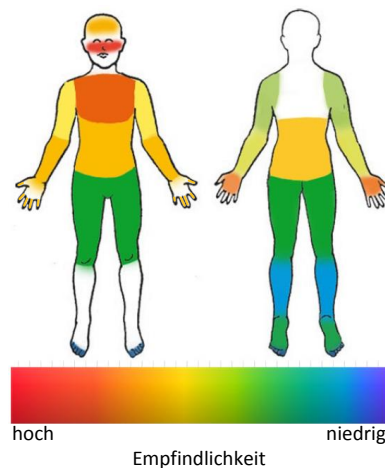
#### **3.3.3.1 Signalübertragung über thermische Reize**

Für Informations- bzw. Warnsysteme durch thermische Reize sind zwei Übertragungswege denkbar. Zum einen die Übertragung per Strahlungswärme durch die Luft, zum anderen durch direkten Kontakt mit der Haut.

Strahlungswärme wäre durch die Aufstellung von Wärmestrahlern zwar möglich, doch die Wahrnehmbarkeit an einem heißen Sommertag könnte sich als problematisch herausstellen. Auch aus energetischen Gesichtspunkten ließe sich ein solcher Signalgeber eher schwierig realisieren. Da ein solches System in der Umgebung der betroffenen Personen aufgestellt werden müsste, wäre die Umsetzung als individuelles Informations- bzw. Warnsystem nicht möglich. Aus diesen Gründen soll dieses Vorgehen nicht weiter verfolgt werden.

Systeme mit direktem Kontakt mit der Haut geben die Möglichkeit, sowohl Warmreize als auch Kaltreize zu realisieren. Laut Stevens und Choo (1998) ist der menschliche Körper in allen Regionen für Kaltreize empfindlicher als für Warmreize. Aus diesem Grund soll bei der Entwicklung eines thermischen Systems der Weg über die Wahrnehmung von Kälte eingeschlagen werden.

Abbildung 29 zeigt die Empfindlichkeiten der verschiedenen Körperregionen für die Wahrnehmung von Kaltreizen (Hartmann & Miller, 2013; Stevens & Choo, 1998; von Campenhausen, 1981b). Die rechte und die linke Körperseite verhalten sich dabei gleich (Meh & Denislic, 1994).



**Abbildung 29 Empfindlichkeit gegenüber Kaltreizen (Hartmann & Miller, 2013; Stevens & Choo, 1998; von Campenhausen, 1981b)**

Die Bauch- und Rückenregion erscheint für die Anbringung eines Signalgebers besonders geeignet. Sie entspricht zwar nicht den empfindlichsten Stellen, wie z.B. in der Gesichtsregion, bietet dafür aber Platz für die großflächige Einwirkung von Kaltreizen. Je größer die Fläche, desto besser die Wahrnehmung (von Campenhausen, 1981a) (vgl. Kapitel 2.2.4.2). Außerdem stört ein Signalgeber in der Bauch- und Rückenregion weniger bei der Ausübung von Arbeitsaufgaben.

### **3.3.3.2 Signalübertragung über mechanische Schwingungen**

Im Bereich der Signalübertragung durch mechanische Schwingungen existieren bereits einige Systeme. Röbig (2015) entwickelte ein System, das durch konkave Rückmeldungen im Bereich der Fingerspitzen unterschiedliche Signale übermitteln kann. Diese Technik lässt sich innerhalb dieser Arbeit aber nicht nutzen, da die benötigte Empfindlichkeit nur im Bereich der Fingerspitzen gegeben ist. Tsukada und Yasumura (2004) veröffentlichten ihre Entwicklungen an einem „ActiveBelt“. Dieser Gürtel enthält acht Vibrationsmotoren, die in einer Reihe einmal um den Bauch reichen. Er dient dazu, im Zusammenspiel mit einem GPS-System Personen navigieren zu können. Weber et al. (2011) arbeiten an einem System, das um das Handgelenk getragen wird und sechs Vibrationsmotoren beinhaltet. Das System unterstützt gezielte Handbewegungen, die mit geschlossenen Augen durchzuführen sind. Van Erp arbeitet mit einer Gruppe an einer taktilen Weste mit vielen Vibrationsmotoren über den Oberkörper verteilt (van Erp & Self, 2008; van Erp & van Veen, 2003). Dieses System wird für das

Militär und die Raumfahrt entwickelt, um z.B. Helikopterpiloten bei der Navigation oder in schwierigen Situationen zu unterstützen. Im Weltall soll das System genutzt werden, um den Astronauten eine Rückmeldung über die eigene Körperlage zu liefern. Es kann aber auch in Gefahrensituationen zu einem Rettungsweg navigieren.

Zur Entwicklung eines eigenen Systems zum Gebrauch in komplexen Arbeitskontexten sollen Erkenntnisse aus den bereits existierenden Lösungen gewonnen werden, um daraus ein eigenes Konzept zu generieren. Die Lösung am Handgelenk erscheint in diesem Zusammenhang als nicht geeignet, da gerade bei der Arbeit mit Arbeitsmaschinen mechanische Schwingungen in den Arm eingeleitet werden, die leicht zu einer Überdeckung der Signale führen können. Die Weste stellt eine geeignete Variante der Signalübertragung dar, erscheint aber für den Einsatz in nicht klimatisierten Räumen bei sommerlichen Temperaturen eine schlecht zumutbare Option zu sein. Auch der Energieverbrauch für ein mobiles System wäre sicherlich ein Problem.

### 3.4 Gestaltungshinweise zur Übermittlung relevanter Informationen

Nach dem in Kapitel 2.1 vorgestellten Vorgehen erfolgt nach der erfolgreichen Erweckung der Aufmerksamkeit der betroffenen Person die Übermittlung der relevanten Informationen. Analog zur zweiten Forschungsfrage sollen hier Hinweise für Konzepte gegeben werden, die eine geeignete Unterscheidbarkeit und eine Einstufung der Dringlichkeit liefern.

Ermöglicht werden soll dies durch den Einsatz von visuellen Displays zur Darbietung der Informationen, was im folgenden Kapitel näher beschrieben wird.

#### 3.4.1 Informationsdarbietung über visuelle Displays

In diesem Kapitel werden Gestaltungshinweise zu möglichen Konzepten für eine visuelle Informationsübertragung durch Displays vorgestellt. Dabei stützt sich die Darbietung der Informationen auf die Verwendung von Icons.

Das Auge ermöglicht es, Informationen schnell zu erkennen und zu interpretieren (vgl. Kapitel 2.2.2). Dabei können Informationen auf unterschiedliche Weise kodiert sein. In Kapitel 3.3.1 ging es darum, sehr simple Signale mit wenig Informationsgehalt zu übermitteln. Deshalb mussten sie sehr intuitiv wahrnehmbar sein, um Aspekte wie Bedeutung oder Dringlichkeit trotzdem verständlich zu machen.

In diesem Kapitel geht es darum, komplexere Informationen einfach verständlich zu übermitteln. Dies ist durch den Einsatz einfacher Blinklichter nicht mehr realisierbar. Aus diesem Grund sollen Displays eingesetzt werden, die eine Darstellung beliebiger Informationen er-



möglichen. Um mögliche Sprachbarrieren zu überwinden oder Problemen durch Analphabetismus zu begegnen, sollen die Informationen über den Einsatz von Icons vermittelt werden (Bauer, Bravo-Lillo, Cranor, & Fragkaki, 2013; Rousseau & Wogalter, 2006; Wogalter, Silver, Leonard, & Zaikina, 2006). Die folgenden Unterkapitel berichten über Gestaltungshinweise zu den möglicherweise einsetzbaren Displaytypen und den Icons. Dies beinhaltet die Positionierung des Displays (vgl. Kapitel 3.4.1.1), die Farbdarstellung (vgl. Kapitel 3.4.1.2) und die Iconentwicklung (vgl. Kapitel 3.4.1.3).

#### **3.4.1.1 Positionierung des Displays**

Zur Positionsbestimmung des Displays erfolgen ähnliche Abwägungen wie schon bei den visuellen Signalgebern zur Erweckung der Aufmerksamkeit aus Kapitel 3.3.1.1. Ausschlaggebend für die Positionierung des Displays ist, dass die Aufmerksamkeit bereits auf dem Informations- bzw. Warnsystem ruht. Es ist also nicht entscheidend, die Informationen im Gesichtsfeld darzustellen, um sie sicher erkennen zu können. Vielmehr kann die betreffende Person aktiv werden, um sich die Informationen abzurufen.

Diese Arbeit verfolgt zwei Wege zur Gestaltung von Informations- bzw. Warnsystemen. Bei beiden handelt es sich um mobile Lösungen, da das System immer am Körper der betreffenden Person getragen werden soll. Der eine Weg versucht, ähnlich wie die LED-Brille, die Informationen direkt im Gesichtsfeld darzustellen. Diesen Zweck erfüllen so genannte „Head-Mounted-Displays“, kurz HMD. Es handelt sich um sehr kleine Displays, die durch ein Haltegestell am Kopf befestigt sind (Eash, Mc Lean, Mozo, Licina, & McEntire, 1999). Der andere Weg führt über ein Display, das direkt oberhalb des Handgelenks befestigt wird. Hier muss der Benutzer zum Abrufen der Informationen erst das Display im Gesichtsfeld positionieren. Im Folgenden sollen beide Systeme kurz vorgestellt werden.

Das HMD bietet die Möglichkeit, Bildschirminhalte direkt im Gesichtsfeld darzustellen. Dazu kommt ein sehr kleines Display zum Einsatz, das mit einem vorgeschalteten Linsensystem im Sichtbereich des Auges positioniert wird (Rash, 2009). Die Optik ermöglicht die virtuelle Anzeige des Bildschirminhaltes in größerer Distanz, als es physikalisch der Fall ist (DIN EN ISO 9241-302). Der Benutzer hat das Gefühl, das Bild sei in einem angenehmen Sehabstand von ca. 1,5 Meter in den Raum projiziert. Die hier betrachteten Systeme arbeiten monokular und sind unterhalb des Auges positioniert. So bleibt genug Gesichtsfeld zur Verfügung, damit es zu keinen Wahrnehmungsschwierigkeiten mit der Umwelt kommt (Pfendler, Wid, & Schlick, 2005; Schmidt et al., 2008). Dies hat zur Folge, dass der Benutzer zum Abrufen der Informationen mit dem Auge nach unten blicken muss. In diesem Zusammenhang ist es wich-

tig, auch die Sehleistung der Augen selbst zu betrachten. Die meisten Menschen besitzen ein dominantes Auge, das ist in 70% aller Fälle das rechte (Porac & Coren, 1981). Das HMD sollte vor dem dominanten Auge positioniert werden. Leider sind HMD filigran und zusammen mit dem Gestell am Kopf sehr anfällig gegenüber äußerer Gewalteinwirkung. Auch die Kosten sind höher als die von größeren Displays. Hier muss abgewogen werden, in welchen Fällen ein permanentes Display im Gesichtsfeld nötig erscheint.

Das Display am Handgelenk hat den Vorteil, dass der Benutzer es automatisch in einem angenehmen Winkel (DIN EN ISO 9241-302) und Abstand vor dem Auge positionieren wird. Allerdings ist die Größe des Displays sehr begrenzt, um nicht bei der Ausübung der Arbeitsaufgabe zu behindern. Die geringe Anzeigefläche reduziert demnach auch die darstellbaren Inhalte auf dem Display. Für den industriellen- bzw. den militärischen Bereich existieren bereits Lösungen, die für den Einsatz unter schwierigen Einsatzbedingungen geeignet wären (Eurotech, 2014). Diese Systeme sind erprobt und könnten direkt für den Einsatzzweck als Informations- bzw. Warnsystem konfiguriert werden. Negative Effekte wie Spiegelungen oder blendendes Sonnenlicht können bei diesen Systemen durch spezielle Displaybeschichtungen minimiert oder, falls die störenden Effekte zu stark auftreten, durch das Schwenken des Handgelenks in eine geeignetere Position reduziert werden.

#### **3.4.1.2 Farbdarstellung**

Im Unterschied zu Kapitel 3.3.1.2 bezieht sich die Farbdarstellung hier auf die dargestellten Inhalte des Displays. Da es sich wegen der besseren Erkennbarkeit um Icons handelt (Dewar, 2006), müssen die verwendeten Farben so aufeinander abgestimmt werden, dass die Farben untereinander unterscheidbar bleiben (Koether, 2001; Stapelkamp, 2009).

Die verwendeten Farben für die beiden Gefahrenmeldungen sollen wie in Kapitel 3.3.1.2 bei Gelb und Rot bleiben (Wogalter & Cox III, 2006). Durch die Verwendung von Displays ist die Farbauswahl jedoch nicht ausschließlich auf die Farben verfügbarer LED Leuchten beschränkt. Wichtig ist allerdings, dass die Farben in den verschiedenen Umgebungsbedingungen gut wahrgenommen werden können und dadurch nicht in ihrer Bedeutung zu verwechseln sind (DIN 4844-1; Stapelkamp, 2009). Sicherheitsfarben (DIN 4844-1; DIN 5381; DIN ISO 3864-1; DIN ISO 3864-3) können hier Abhilfe schaffen. Sie sind bereits Sicherheitsaussagen zugeordnet, in denen sie ihre Wirkung am geeignetsten entfalten (DIN ISO 3864-2). Gleichzeitig schafft eine normierte Anwendung von Farben eine einheitliche Grundlage, um den Einsatz falscher Farben zu vermeiden.

Die RAL Farbmustertabellen (RAL, 2014) beinhalten diese Sicherheitsfarben. Es wird in Signal- und Verkehrsfarben unterschieden, beide Kategorien scheinen für den Einsatz in Informations- bzw. Warnsystemen geeignet. Wie sich allerdings herausstellte, werden diese Sicherheitsfarben vor allem auf bedruckbaren Medien wie z.B. Schildern eingesetzt. So sind die Farben auf Displays nur angenähert im RGB Farbraum abzubilden. Tabelle 6 zeigt sowohl die Signal- als auch die Verkehrsfarben in Rot und Gelb im Vergleich mit den Grundfarben, die auch in Kapitel 3.3.1.2 zum Einsatz kamen.

**Tabelle 6 Darstellung der Verkehrs- und Signalfarben (RAL, 2014)**

Verkehrsrot RGB (184;29;19)	reines Rot RGB (255;0;0)	Signalrot RGB (153;35;35)
Verkehrsgelb RGB (239;183;118)	reines Gelb RGB (255;225;0)	Signalgelb RGB (244;169;20)

Die Farbdarstellung erfolgt im RGB Farbraum und kommt so den auf einem Display angezeigten Farben nahe. Im direkten Vergleich (vgl. Tabelle 6) erscheinen die reinen Farben wesentlich auffälliger und werden aus diesem Grund auch für die weitere Betrachtung verwendet.

Um für die anschließende Gestaltung der Icons mehr Spielraum zu gewinnen, bieten Kontrastfarben die Möglichkeit, einzelne Elemente gezielt gegeneinander abzugrenzen (DIN ISO 3864-1; Stapelkamp, 2007). Daher kommt als Kontrastfarbe von Rot die Farbe Weiß in Frage und für Gelb die Farbe Schwarz (DIN EN ISO 15008).

Abschließend sollen die ausgewählten Farben, wie in Kapitel 3.3.1.2 beschrieben, durch ihren Farbabstand  $\Delta L_{uv}$  im  $L_{uv}$  Farbraum überprüft werden. Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen. Zusätzlich dargestellt sind die Farben, die sich durch eine Farbfehlsichtigkeit ergeben würden (vgl. Kapitel 3.3.1.2). Gerade bei in Icons nebeneinander dargestellten Farben darf es nicht zu Verwechslungen oder einem Verschwimmen zweier Farben kommen.

Tabelle 7 Farbabstände der verwendeten Iconfarben im  $L_{uv}$  Farbraum

Farbe	RGB Anteile			Farbe	Farbabstand $\Delta L_{uv}$							
		R	G	B								
Weiß		0	0	0		0	100,0	186,8	144,6	87,6	114,6	97,2
Schwarz		255	255	255		100,0	0	185,0	107,1	62,9	85,9	7,3
Rot		255	0	0		186,8	185,0	0	186,2	163,0	168,8	177,9
Gelb		255	255	0		144,6	107,1	186,2	0	61,4	31,5	105,4
Protanopes Rot		120	100	25		87,6	62,9	163,0	61,4	0	31,0	59,1
Deutanopes Rot		165	145	5		114,6	85,9	168,8	31,5	31,0	0	83,0
Tritanopes Gelb		255	230	230		97,2	7,3	177,9	105,4	59,1	83,0	0

Farben mit einem Farbabstandswert  $\Delta L_{uv}$  von größer als 20 (DIN EN ISO 9241-303) können voneinander unterschieden werden. Dies gilt für alle Kombinationen mit Ausnahme der Farbkombination Weiß – tritanopes Gelb. Hier muss bei der Gestaltung darauf geachtet werden, keine Weiß-Gelb-Kombination zu verwenden.

Ansonsten können alle Farbkombinationen bei der Gestaltung der Icons verwendet werden. Das Vorgehen dabei wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

### 3.4.1.3 Iconentwicklung

Die Iconentwicklung erfolgte iterativ, so konnten die einzelnen Details schrittweise betrachtet werden. Ziel war es, zwei möglichst gut unterscheidbare Icons zu generieren, die den Nutzer über die Art der Gefahrenmeldung informieren und aus denen zusätzlich die Dringlichkeit der Situation hervorgeht.

Geeignete Möglichkeiten eine gute Unterscheidbarkeit zu gewährleisten, stellen nach Koether (2001) die in Kapitel 3.4.1.2 beschriebene Farbkodierung, eine geometrische Kodierung (DIN EN ISO 9241-8; DIN EN ISO 9241-12) oder eine Kodierung mit verschiedenen Symbolen dar (McDougald & Wogalter, 2014). Auch Blinkeffekte sind geeignet, die Dringlichkeit zu vermitteln und gleichzeitig eine bessere Unterscheidung zu ermöglichen (DIN EN ISO 9241-303; VDI/VDE 3850 Blatt 1).

#### Geometrische Kodierung:

Ziel einer geometrischen Kodierung ist es, durch die Einführung grundlegender geometrischer Formen einen Wiedererkennungswert zu schaffen. Im Falle der Informations- bzw. Warnsysteme könnte dieser Sachverhalt z.B. dafür genutzt werden, ein durch ein Dreieck kodierte Icon in einem weiteren Schritt auch durch die Eingabe eines Dreiecks zu bestätigen (vgl. Kapitel 3.6.4.2).

Außerdem existieren Darstellungen aus grundlegenden geometrischen Formen, die im Alltag eine weite Verbreitung haben. So nutzen z.B. Verkehrsschilder unterschiedliche Formen, um

auf Gefahren hinzuweisen oder Hinweise zu geben. Diese Formen sind bereits in Normen zu finden (DIN ISO 3864-1; VDI/VDE 3850 Blatt 1). Danach wird vor einer Gefahr am geeignetsten mit der Grundform eines Dreiecks gewarnt und ein Hinweis durch ein Rechteck symbolisiert (VDI/VDE 3850 Blatt 1). Ein Kreis würde ein Gebot bzw. ein Verbot widerspiegeln, doch im Hinblick auf die Realisierung einer Rückmeldung durch eine gezeichnete Geste (vgl. Kapitel 3.6.4.2) ist das Dreieck als Gefahrenform besser geeignet.

### **Kodierung durch unterschiedliche Symbole:**

Unter dem Symbol wird die Darstellung im inneren Bereich der vorher beschriebenen geometrischen Form verstanden. Es soll es dem Nutzer erleichtern, die Bedeutung des Icons zu verstehen (Dewar, 2006). Diese Darstellungen ergeben sich meist aus dem Nutzungskontext, hier sollen diese auf den Kontext Gleisbau bezogen werden.

Um eine geeignete Auswahl zu treffen, wurden am Institut für Arbeitswissenschaft in Darmstadt Expertenbefragungen (Sarodnick & Brau, 2011) durchgeführt. Es nahmen acht Experten mit Erfahrung in Produktergonomie und Interfacegestaltung, plus ein Designer, teil (Tondera, 2013). Hier kristallisierten sich die beiden aus der StVO stammenden Zeichen 101 und 151 (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung., 2014) heraus.

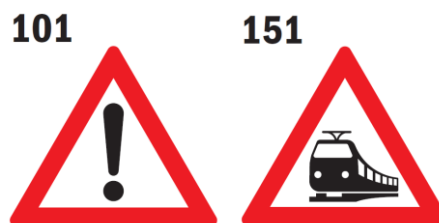


Abbildung 30 Icons aus der StVO (ADAC e.V., 2014)

Das Ausrufezeichen symbolisiert eine Gefahrenstelle und soll im weiteren Verlauf auf eine Gefahr auf dem Nachbargleis hinweisen (Warnung). Das Zeichen für einen unbeschränkten Bahnübergang wird als Ausgangssymbol für einen auf dem Arbeitsgleis herannahenden Zug verwendet (Alarmierung). Die Symbole ähneln einander nicht in ihrer grundsätzlichen Darstellung und sind damit gut zu unterscheiden. Von der Bedeutung soll das Ausrufezeichen ausschließlich auf eine Gefahr hinweisen und verlangt somit nicht zwangsläufig nach einer Handlung. Bei dem Zugsymbol hingegen soll die Gefahr des herannahenden Zuges direkt verbildlicht werden, da hier eine Reaktion notwendig ist.

Beide Symbole sind für das Anwendungsbeispiel Gleisbau gewählt worden und sind in anderen Nutzungskontexten erneut auf ihre Eignung zu prüfen.

**Kodierung durch Blinkeffekte:**

Blinkeffekte sind für die Anforderung der Unterscheidbarkeit nicht optimal geeignet (Koether, 2001). Allerdings sind sie gut geeignet, ein Signal dringlicher oder weniger dringlich erscheinen zu lassen. Deshalb sollen die auf dem Display dargestellten Icons blinken. Genau wie in Kapitel 3.3.1.4 beschrieben, sollten auch in diesem Fall die Blinkfrequenzen zwischen 0,5 Hz und 3 Hz gewählt werden. Allerdings wird ein Tastverhältnis von 70 % empfohlen, um die Lesbarkeit der Icons während des Blinkens nicht zu beeinträchtigen (DIN EN ISO 9241-303; VDI/VDE 3850 Blatt 1; Früh & Ahrens, 2009; Zühlke, 2012).

### 3.5 Gestaltungshinweise zur Rückmeldung durch den Nutzer

Die Rückmeldung durch den Nutzer stellt den letzten Schritt nach der in Kapitel 2.3 dargestellten Abfolge dar. Nachdem die Aufmerksamkeit des Nutzers auf dem Informations- bzw. Warnsystem liegt und die Informationen abgerufen wurden, ist durch eine Rückmeldung des Nutzers die korrekte Handlungsintention zu prüfen. Aufgrund der Rückmeldung kann das System entscheiden, ob das Ziel der Information bzw. Warnung erreicht ist oder bei keiner bzw. einer falschen Rückmeldung der Vorgang der Signalübermittlung angepasst werden muss. Damit ist der Rückmeldungsprozess ein wichtiger Schritt zur vollständigen Betrachtung eines Informations- bzw. Warnprozesses.

Aufgrund der Fokussierung dieser Arbeit auf die Signal- und Informationsübertragung soll die Rückmeldung nicht in der Tiefe behandelt werden, wie dies in den vorherigen Kapiteln der Fall war.

Wie in Kapitel 2.6 bereits festgestellt wurde, existieren nur wenige Systeme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten mit einer aktiven Rückmeldung. Dem Weg der bereits existierenden Variante einer Rückmeldung über vorformulierte Textnachrichten soll in dieser Arbeit nicht nachgegangen werden. Ziel ist es, eine einfache Form der Rückmeldung zu finden, die es ermöglicht, zwischen mehreren Signalen zu unterscheiden, ohne dabei einen Text lesen zu müssen. Hier steht eine intuitive Bedienweise im Vordergrund, die eine Unterscheidung auf anderen Wegen ermöglicht.

Es sollen drei verschiedene Konzepte einer Rückmeldefunktion getestet werden. Dies beinhaltet eine sehr einfache Lösung über die Nutzung verschiedener Taster auf einem Bedienfeld, die Nutzung eines Touchscreens mit Bereichen zur Bestätigung und die Bestätigung über Gesten ebenfalls auf einem Touchscreen (vgl. Kapitel 3.6.4.2).

Die Umsetzung der Konzepte erfolgt im nächsten Kapitel. Hier wird auch genauer auf die Entwicklung der Prototypen und Signale eingegangen.

### 3.6 Entwickelte Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen

Nachdem aus den vorherigen Kapiteln nun die Gestaltungshinweise für Konzepte von Informations- bzw. Warnsystemen vorliegen, sollen hier fertige Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen erarbeitet werden.

#### 3.6.1 Entwicklung anhand des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses

In diesem Kapitel soll der menschenzentrierte Gestaltungsprozess (DIN EN ISO 9241-210) als Grundlage für das iterative Entwickeln der Konzepte, Prototypen und Signale eingeführt werden. Der Prozess (siehe Abbildung 31) ist der DIN EN ISO 9241-210 zugeordnet. Sie beschreibt einen Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (Sarodnick & Brau, 2011). Das Besondere an diesem Prozess ist die iterative Vorgehensweise (Abrams, Maloney-Krichmar, & Preece, 2004). Zu Beginn wird der Nutzungskontext analysiert und festgehalten. Den zweiten Schritt stellt die Definition von Nutzeranforderungen an das zu entwickelnde System dar. Es folgt die Gestaltung der Prototypen, die dann im letzten Schritt evaluiert werden. Nach dieser ersten Iterationsschleife stellt sich die Frage, ob das gestaltete System den Nutzeranforderungen genügt oder ob eine weitere Iterationsschleife nötig ist. Im Falle weiterer Schleifen ist es nicht zwingend notwendig, wieder alle Schritte zu durchlaufen.

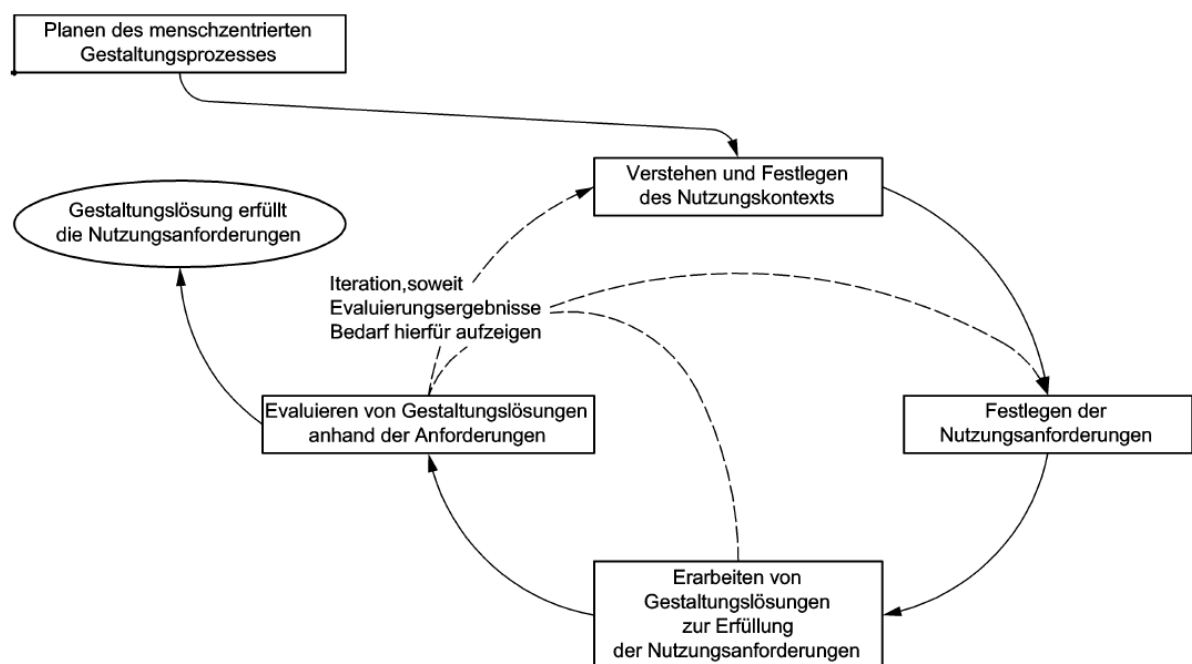


Abbildung 31 Menschenzentrierter Gestaltungsprozess nach (DIN EN ISO 9241-210)

Im Falle der Entwicklung von Informations- bzw. Warnsystemen soll das Vorgehen nach DIN EN ISO 9241-210 gewählt werden, um die Möglichkeit zu nutzen, die einzelnen Prototypen sukzessive weiterentwickeln zu können (Abrás et al., 2004).

Dazu wurden im Vorfeld die generelle Vorgehensweise für alle entwickelten Prototypen und Signale geplant und Vorkehrungen getroffen, die Ergebnisse der Iterationsschritte sinnvoll dokumentieren zu können. Hier wurden die Gestaltungshinweise gesammelt und in der nächsten Schleife umgesetzt.

Der für das Informations- bzw. Warnsystem vorgesehene Nutzungskontext in einem sicherheitsrelevanten Arbeitsfeld wurde in Form des Gleisbaus bereits in Kapitel 2.4 vorgestellt. Hier geschah bereits die Einführung des Arbeitssystems und der Umgebungsbedingungen. Außerdem wurden die Arbeitsaufgabe, die Arbeitsmittel und die Arbeitsobjekte beschrieben.

Die Definition der Anforderungen geschieht jeweils in den Kapiteln vor der Beschreibung der Prototypen- bzw. Signalgestaltung.

Die am Ende jedes Iterationsschrittes stattgefundenen Evaluationen fanden entweder im Sinne eines Expertenratings (Sarodnick & Brau, 2011) oder durch Nutzerstudien statt.

So wurden zuerst die Prototypen der einzelnen Signalgeber entwickelt und verfeinert und in den letzten Iterationen das gesamte Konzept eines Informations- bzw. Warnsystems betrachtet und evaluiert. Die beiden finalen Studien werden in Kapitel 4 vorgestellt.

### **3.6.2 Erweckung der Aufmerksamkeit**

In diesem Kapitel sollen die Gestaltung der Konzepte und danach die daraus resultierenden Prototypen und Signale erklärt werden, die am Beginn jedes Informations- bzw. Warnprozesses zur Erweckung der Aufmerksamkeit notwendig sind. Wie im Kapitel 2.3.4 angesprochen, handelt es sich bei den umgesetzten Signalen um ein Warnsignal und ein Alarmsignal. Es wird darauf verzichtet, sich nur auf ein Signal pro Modalität zu beschränken, da es möglich sein soll, bereits bei der Erweckung der Aufmerksamkeit das Signal richtig deuten zu können. Die Signale setzen sich dabei aus den jeweiligen Einzelsignalen der verschiedenen Modalitäten (visuell, akustisch und taktil) zusammen.

Im weiteren Verlauf des Kapitels sollen visuelle, akustische und taktile Signale sowie die dazugehörigen Signalgeber entwickelt werden. Dies geschah für die jeweiligen Modalitäten in mehreren Iterationsschritten vom einfachen Versuchsträger zum finalen Signal bzw. Prototypen. Durch das einheitliche Vorgehen nach den menschenzentriertem Gestaltungsprozess (DIN



EN ISO 9241-210) sollte verhindert werden, wichtige Aspekte bei der Entwicklung zu übersehen.

Der Nutzungskontext und die abgeleiteten Anforderungen machten es möglich, nach einem geeigneten Ort für die Platzierung der Prototypen und nach einer geeigneten Darbietungsart (z.B. visuell über die Nutzung von LEDs) zu suchen. Ausgehend von der Positionierung und der Darbietungsart konnten die einzelnen Parameter für die Gestaltung der Signale ermittelt werden. An wichtigen Entscheidungspunkten erfolgten kleinere Vorversuche oder Expertenbefragungen (Sarodnick & Brau, 2011), um die Komplexität der unterschiedlichen Varianten von Prototypen und Signalen in einem überschaubaren Rahmen halten zu können. In den folgenden Iterationsschritten wurden nicht mehr alle Stufen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses (DIN EN ISO 9241-210) durchlaufen, sondern nur noch die für das Einarbeiten der Änderungen relevanten Schritte.

Die finalen Prototypen und Signale sollen durch ein Versuchskonzept evaluiert werden. Aus Komplexitätsgründen sollen dort allerdings nur die visuellen und akustischen Prototypen und Signale betrachtet werden. Die Arbeiten am taktilen Konzept sollen in dieser Arbeit nicht abschließend geprüft werden, da hier zukünftig noch einige Weiterentwicklungen nötig sind.

Begonnen werden soll nun mit der Vorstellung der Anforderungen zu den visuellen Prototypen und ihren Signalen.

### **3.6.2.1 Anforderungen an visuelle Prototypen**

Die Anforderungen ergeben sich aus dem Nutzungskontext (vgl. Kapitel 2.4). Hier wurden zum einen relevante Arbeitsinhalte und zum anderen die vorherrschenden Umgebungsbedingungen betrachtet.

Die primäre Aufgabe von Arbeitspersonen auf einer Gleisbaustelle ist die Erledigung ihrer Arbeitsaufgabe. Um dabei nicht ständig auf eine visuelle Anzeige blicken zu müssen, sollte diese im gut wahrnehmbaren Gesichtsbereich (DIN EN 894-2; DIN EN 842; VDI/VDE 3546 Blatt 5) der betreffenden Personen liegen (AF1). Auftretende Umgebungsbedingungen sollten durch das Informations- bzw. Warnsystem abgedeckt werden. Das heißt, das System muss auf unterschiedliche Leuchtdichteunterschiede reagieren, damit es nicht zu Blendungseffekten (DIN 5340; DIN EN 894-2; DIN EN 842; VDI/VDE 3546 Blatt 5) kommt (AF2). Um die Bedeutung der Signale (Alarmierung und Warnung) auch schon während der Erweckung der Aufmerksamkeit deuten zu können, müssen zwei unterschiedliche Signale entwickelt werden. Dabei sollen geeignete Farben (DIN EN 842; DIN EN 981; BGI 523) (AF3) die Deutung der

Signale unterstützen. Gleichzeitig muss die Unterscheidbarkeit (AF4) der Signale gewährleistet werden (DIN EN ISO 9241-12; DIN EN ISO 14738; DIN EN 842; VDI/VDE 3850 Blatt 1). Ein weiterer Punkt ist die Dringlichkeit (AF5) der Situation, die durch die Signale wiedergegeben werden muss (DIN EN ISO 9241-12; DIN EN 842).

Zusammenfassend sollen nun die Anforderungen für die Erweckung der Aufmerksamkeit durch visuelle Signale dargestellt werden:

- AF1** Die Darstellung der visuellen Signale muss im gut wahrnehmbaren Bereich des Gesichtsfeldes liegen.
- AF2** Die betreffende Person darf durch den Einsatz des Informations- bzw. Warnsystems nicht geblendet werden.
- AF3** Die visuellen Signale für Alarmierung und Warnung müssen in geeigneten Farben dargestellt werden.
- AF4** Die visuellen Signale für Alarmierung und Warnung müssen klar voneinander unterscheidbar sein.
- AF5** Die Dringlichkeit der Situation muss auch aus den visuellen Signalen hervorgehen.

Im folgenden Kapitel sollen nun die zu den Anforderungen gehörenden visuellen Prototypen und Signale vorgestellt werden.

### **3.6.2.2 Visuelle Prototypen und Signale**

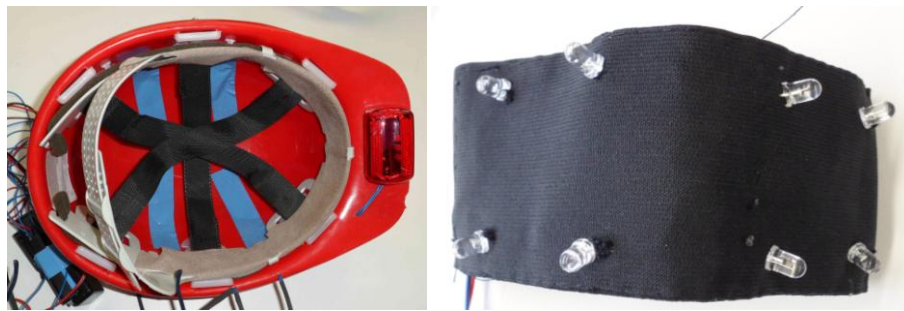
Die Entwicklung der Prototypen startete mit der grundlegenden Anforderung nach einem personengebundenen Informations- bzw. Warnsystem. Damit sollten ortsfeste Systeme, wie die kollektiven Warnsysteme im Gleisbau, nicht weiter betrachtet werden. Für die Entwicklung eines personengebundenen Systems startete zunächst eine Analyse der Utensilien, die in vielen sicherheitskritischen Arbeitskontexten zu finden sind. Dabei wurden die Arbeitsmittel näher betrachtet. Hier sind zentral die persönliche Schutzausrüstung (PSA) und unterschiedlichen Werkzeuge zu finden.

Die Werkzeuge wurden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen, da sich die äußere Form der einzelnen Werkzeuge zu stark voneinander unterscheidet. Hier einheitliche Signale zu entwickeln, die zusätzlich noch eine Positionskodierung zulassen, gestaltet sich als schwierig. Zusätzlich kann nicht sehr gut abgeschätzt werden, wie oft sich ein Werkzeug im Gesichtsfeld der betreffenden Person befindet.

Die PSA liefert in diesem Zusammenhang schon mehr Vorteile zur Anbringung von visuellen Signalgebern. In vielen sicherheitskritischen Arbeitskontexten müssen Warnwesten, Sicherheitsbrillen und Helme getragen werden. Zusätzlich soll hier ein Band zur Betrachtung hinzugezogen werden, das am bevorzugten Arm getragen wird, etwa wie eine Armbanduhr oder ein technisches Gerät, das kurz hinter dem Handgelenk getragen wird.



**Abbildung 32 Erste Prototypen: Warnweste und Sicherheitsbrille (Ringwald, Saul, Wagner, Wedel, & Wurst, 2011)**



**Abbildung 33 Erste Prototypen: Helm und Armband (Kwirotek, Schad, Yanza, & Casteels, 2011)**

Diese vier Elemente wurden in Form von sehr einfachen Prototypen umgesetzt, um ein Gefühl zu bekommen, welche Umsetzung für eine genauere Betrachtung in Erwägung gezogen werden kann. Abbildung 32 (Ringwald et al., 2011) und Abbildung 33 (Kwirotek et al., 2011) zeigen diese ersten Prototypen.

Zu den beiden Prototypen aus Abbildung 32 wurde eine Vorstudie mit fünf Personen im Alter zwischen 20 und 30 Jahren durchgeführt. Alle fünf waren männliche Studenten an der TU Darmstadt (Ringwald et al., 2011). Die Warnweste wurde mit einer LED-Leiste auf beiden Seiten der Brust und einer roten Blitzleuchte ausgestattet. Die einzelnen Elemente sind von ihrer Position variabel angebracht. Leider konnte dieser Prototyp nicht überzeugen, da in den Vorversuchen einzelne Elemente nicht wahrgenommen werden konnten bzw. führte eine Steigerung der Leuchtstärke schnell zu Blendungseffekten. Auch eine Farb- bzw. Positionskodierung konnte am eigenen Körper nicht sinnvoll umgesetzt werden. Der Einsatz in Personengruppen wäre eine Möglichkeit auch eine Positionskodierung umzusetzen, würde dann aber wahrscheinlich in geeigneter Leuchtstärke wieder zu Blendungseffekten führen. Da das

System aber auch für Einzelpersonen geeignet sein sollte, kam es zu keiner weiteren Betrachtung dieser Variante.

Ebenfalls in Abbildung 32 dargestellt findet sich die LED-Schutzbrille. Dieses Konzept ist sehr vielversprechend. Es ermöglicht beide geplante Signale (Alarmierung und Warnung) mithilfe von gelben und roten LEDs umzusetzen. Der Einsatz einer Positionskodierung sowie Blinkeffekte können ebenfalls integriert werden. Bei den Vorversuchen erwies sich die Wahrnehmbarkeit als geeignet für die Gestaltung weiterer Prototypen (Ringwald et al., 2011). Diese und die dazugehörigen Signale sollen später im Kapitel vorgestellt werden.

Zu den beiden Prototypen aus Abbildung 33 wurde ebenfalls eine Vorstudie durchgeführt. Hier nahmen vier Personen im Alter zwischen 20 und 30 Jahren teil. Drei männliche Studenten und eine weibliche Studentin, alle von der TU Darmstadt (Kwiotek et al., 2011). Der Helm stellte sich in den Vorversuchen als ungeeignet heraus. Die LEDs im vorderen Bereich liegen im Gesichtsfeld zu hoch und wurden teilweise durch Haare verdeckt (Kwiotek et al., 2011). Die betreffende Person müsste hochschielen, um die Signale wahrnehmen zu können. Ansonsten gilt Gleiches wie schon bei der Weste beschrieben, eine Eignung in Gruppen wäre vorstellbar, würde wahrscheinlich aber zu Problemen durch Blendung führen. Bei dem Armband zeigte sich in den Vorversuchen, dass die Position am Handgelenk geeignet erscheint. Es war durchaus möglich, mit Farben zu arbeiten und auch Blinkeffekte zeigten ihre Wirkung. Da die Wahrnehmbarkeit jedoch stark von der Blickrichtung und Armposition abhängt, wurde das Konzept nicht weiter verfolgt. Eine sichere Wahrnehmung konnte nicht gewährleistet werden. Trotzdem soll das Konzept nicht verworfen werden. In Kapitel 3.6.3 dient es in Form eines Displays am Handgelenk zur Übertragung der relevanten Informationen. Natürlich ist es auch schon in der Phase der Erweckung der Aufmerksamkeit aktiv, kann hier aber nur als unterstützend angesehen werden.

### **Die LED-Schutzbrille**

Im Anschluss an die Entwicklung der zuvor beschriebenen einfachen Prototypen wurden die gewonnenen Erkenntnisse genutzt und die LED-Schutzbrille nach dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess (DIN EN ISO 9241-210) weiterentwickelt. Im Gegensatz zum ersten Prototyp fiel die Wahl auf ein anderes Brillenmodell. Dieses erlaubt den Einsatz von mehr LEDs. Abbildung 34 zeigt den finalen Prototypen, der in den Vorversuchen als Versuchsträger diente (Blümel, 2014).

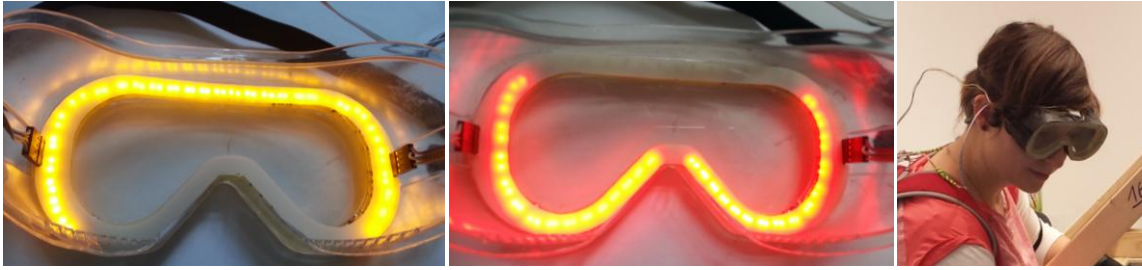


Abbildung 34 LED-Schutzbrille (links und mitte (Blümel, 2014))

Wie in Kapitel 3.3.1.1 beschrieben sind die LEDs im Bereich der noch akzeptablen Wahrnehmbarkeit positioniert, um der betreffenden Person möglichst wenig Gesichtsfeld zur Wahrnehmung der Umgebung zu nehmen. Die Wahl der Farben fiel auf Gelb und Rot (vgl. Kapitel 3.3.1.2). Zur besseren Erkennbarkeit wurden die Farben zusätzlich positionskodiert (vgl. Kapitel 3.3.1.3), wobei die seitlichen LEDs jeweils überlappen. So besteht auch bei abgewendetem Blick eine höhere Wahrscheinlichkeit der Wahrnehmung. Ein Helligkeitssensor misst die Umgebungshelligkeit und berechnet aus den Werten die an die menschliche Wahrnehmung angepasste Helligkeit der LEDs (vgl. Kapitel 3.3.1.5). Abbildung 35 (Blümel, 2014) zeigt die Platine, die für die Aufnahme der LEDs geätzt wurde.



Abbildung 35 CAD-Zeichnung der LED-Platine (Blümel, 2014)

Hier wurden 60 SMD-LEDs pro Farbe verbaut. Diese LED-Form ist kleiner und flacher als herkömmliche LEDs, sie werden jeweils in einer Doppelreihe angeordnet. Dadurch fallen die Randbereiche etwas breiter aus. Die Leuchtstärke der roten LEDs ist laut den Datenblättern mit 460 cd angegeben, die der gelben LEDs laut Datenblatt mit 120 cd. Dieser Unterschied musste konstruktionsbedingt hingenommen werden. Von der eigenen Wahrnehmung aus gesehen, erscheinen trotzdem beide Signale ähnlich hell (eine Einschätzung, die durch die unterschiedlichen Farben kommen kann). Durch die Anordnung der LEDs in einer Doppelreihe wirken die Signale ähnlich eines Farbschlauches, der sich am äußeren Rand entlang zieht. Diese Wahrnehmung wird noch durch eine 0,5 mm dicke matt ausgeführte Plexiglasscheibe verstärkt, die über den LEDs angebracht wird. Diese dient dazu, das Licht der vielen LEDs als

Punktquellen etwas zu zerstreuen, um die Bildung von Nachbildern zu reduzieren (vgl. Kapitel 3.3.1.5).

Wie bereits in Kapitel 3.3.1.5 geschrieben kann es bei großer Umgebungshelligkeit (z.B. direkte Sonneneinstrahlung) zu Wahrnehmungsproblemen besonders bei den gelben LEDs im oberen Bereich der Brille kommen. Um dem entgegenzuwirken, wurden die Außenseiten der Brille mit weißem Klebeband beklebt.

Für diesen endgültigen Versuchsträger sollen nun die entwickelten Signale vorgestellt werden.

### Die Signale

Umgesetzt werden sollen die beiden Signale Alarmierung (Zug kommt auf dem Arbeitsgleis → Gleis sofort räumen!) und Warnung (Zug auf dem Nachbargleis → Vorsicht!). Bei der Umsetzung steht die schnelle Erweckung der Aufmerksamkeit im Vordergrund. Außerdem sollen die Signale klar voneinander unterscheidbar sein und sie sollen einen Rückschluss auf die Dringlichkeit der Situation bieten.

Farblich wurden die beiden Signalfarben Rot und Gelb gewählt. Das dringliche Signal der Alarmierung wird in Rot dargestellt, das hinweisende Signal der Warnung in Gelb. Die beiden Farben sind klar unterscheidbar (vgl. Kapitel 3.3.1.2) und auch die Dringlichkeit geht aus der Farbe hervor (DIN EN ISO 9241-303; Koether, 2001).

Zusätzlich wurden Blinkeffekte benutzt, die mehr Aufmerksamkeit erregen als statische Signale (Crawford, 1963). Beide Signale erhalten eine Frequenz von 2 Hz (vgl. Kapitel 3.3.1.4) (Neudörfer, 2013) und ein Tastverhältnis von 50 %, um die Signale möglichst gut wahrnehmbar darzustellen.

Anschließend werden die beiden Signale noch einmal übersichtlich in einer Tabelle (vgl. Tabelle 8) dargestellt.

**Tabelle 8 Signale über LED-Brille**

<b>Signal</b>	<b>Positionskodierung</b>	<b>Farbe</b>	<b>Blinkfrequenz</b>	<b>Helligkeit</b>
Alarm	Unterer Brillenrand & Seitenränder	Rot	2 Hz; Tastverhältnis 50 %	adaptiv
Warnung	Oberer Brillenrand & Seitenränder	Gelb	2 Hz; Tastverhältnis 50 %	adaptiv

Nach den visuellen Prototypen und Signalen folgen im nächsten Kapitel die akustischen.

### 3.6.2.3 Anforderungen an akustische Prototypen

Auch die Anforderungen an die akustischen Signale und Prototypen ergeben sich aus dem Nutzungskontext (vgl. Kapitel 2.4). Es wurden zum einen relevante Arbeitsinhalte und zum anderen die vorherrschenden Umgebungsbedingungen betrachtet. Um die Anforderungen übersichtlich zu gestalten, soll die Nummerierung der visuellen Anforderungen vorgeführt werden.

Bei der Wahrnehmung von akustischen Signalen spielt der Störschallpegel eine wichtige Rolle. Dieser ist in den meisten Fällen situationsbedingt unterschiedlich hoch. Die akustischen Signale müssen trotz Störschallpegel gut wahrgenommen werden können (AF6) (DIN EN 894-2; DIN EN 614-1; Edworthy & Hellier, 2006; Patterson & Mayfield, 1990). Gleichzeitig darf das Informations- bzw. Warnsystem, im inaktiven Zustand, den Nutzer oder andere betroffene Personen nicht bei ihren Tätigkeiten stören (DIN EN 894-2; Edworthy & Hellier, 2006; Malter & Guski, 2001). Das beinhaltet sowohl die Signale selber, als auch die Signalgeber, die an einem geeigneten Ort angebracht werden müssen. Ein Erschrecken der betroffenen Personen muss ebenfalls ausgeschlossen werden (DIN EN ISO 7731; DIN EN 981) (AF7). Auch die akustischen Signale müssen klar voneinander unterscheidbar sein (AF8) (DIN EN 894-2; DIN EN 981; Malter & Guski, 2001; Neudörfer, 2013). Dies ist besonders wichtig, da auch im akustischen Bereich an die beiden Signale (Alarm und Warnung) konkrete Handlungen geknüpft sind. Wird das Signal vertauscht, könnten die Folgen sehr gefährliche Auswirkungen auf die betreffenden Personen haben. Deswegen ist es sinnvoll, die Dringlichkeit der Situation mit in das Signal zu kodieren (AF9) (DIN EN ISO 9241-12; Edworthy & Hellier, 2006; Malter & Guski, 2001).

Zusammenfassend sind die vier Anforderungen noch einmal im Folgenden dargestellt:

- AF6** Die akustischen Signale müssen trotz Störschallpegel gut wahrnehmbar sein.
- AF7** Die betreffende Person darf durch den Einsatz des Informations- bzw. Warnsystems nicht in ihrer akustischen Wahrnehmung behindert werden.
- AF8** Die akustischen Signale für Alarmierung und Warnung müssen klar voneinander unterscheidbar sein.
- AF9** Die Dringlichkeit der Situation muss auch aus den akustischen Signalen hervorgehen.

Im folgenden Kapitel sollen nun die zu den Anforderungen gehörenden akustischen Prototypen und Signale vorgestellt werden.

### 3.6.2.4 Akustische Prototypen und Signale

Das Vorgehen bei der Entwicklung der akustischen Signalgeber verlief analog zur Vorgehensweise im visuellen Bereich. Zuerst wurden unterschiedliche Signalgeber variiert, von denen aus die akustischen Signale übermittelt werden. Bei allen handelt es sich um personen-gebundene (individuelle) Systeme (vgl. Kapitel 2.3.2.2). Auf Grund der Fragestellung dieser Arbeit wurde der Einsatz ortsfester Systeme vernachlässigt. Ziel der Analyse war es, einen ersten Überblick zu den Gestaltungsmöglichkeiten und erste Aussagen über die generelle Eignung dieser Systeme im beschriebenen Arbeitskontext (vgl. Kapitel 2.4) zu erlangen.

Bei den für diese erste Analyse verwendeten Signalen handelt es sich um ein Alarmsignal (dringliches Alarmsignal) und ein Warnsignal (eher hinweisendes Signal). Beide sind nach Normen (DIN EN ISO 7731; DIN EN 981) gestaltet.

Beim Signal zum Alarm kommt ein Frequenzverlauf in Form eines Sägezahnmodells zum Einsatz. Dabei steigt die Frequenz von 500 Hz linear auf 1500 Hz in 0,75 Sekunden und fällt anschließend sofort wieder zurück auf 500 Hz, danach wiederholt sich der Ablauf.

Die Warnung entspricht einem Rechteckmodell. Zu Beginn springt die Frequenz aus der Ruhe heraus auf 800 Hz und wird für 0,8 Sekunden gehalten. Anschließend kommt eine Pause von 0,2 Sekunden, gefolgt von weiteren 0,3 Sekunden auf 800 Hz und einer Pause von abschließend 0,2 Sekunden.

Die beiden Signale sind recht einfach gehalten und ähneln Gefahrensignalen, die bereits aus dem Alltag bekannt erscheinen.

Als erster Prototyp kam in den Vorversuchen (mit fünf männlichen Studenten) die bereits in Kapitel 3.6.2.2 erwähnte Warnweste mit Lautsprechern auf den Schultern (vgl. linkes Bild in Abbildung 36) zum Einsatz (Ringwald et al., 2011). Es stellte sich schnell heraus, dass durch die Lautstärkevorgaben aus Kapitel 3.3.2.2 nicht nur die betreffende Person die Signale wahrnahm, sondern auch unbeteiligte Personen im Umfeld. Im Falle einer individuell ausgesendeten Nachricht entspräche dieses Mithören eines fremden Signals dem Empfang einer Falschmeldung. Da dies zu falschen Reaktionen und Verwirrung führen kann, ist solch eine Lösung nicht tragbar (DIN EN 981; Haas & Edworthy, 2006; Malter & Guski, 2001).





Abbildung 36 akustische Signalgeber (Luftschall) (Kwiatk et al., 2011; Ringwald et al., 2011; Sennheimer.com)

Als zweite Lösung wurde ein Kapselgehörschützer mit Lautsprechern ausgerüstet (vgl. mittleres Bild in Abbildung 36) (Kwiatk et al., 2011). Im Vorversuch (vier Studenten und eine Studentin vgl. Kapitel 3.6.2.2) übermittelte dieser zwar individuelle Signale, isolierte die betroffenen Personen aber stark von ihrer Umwelt. Es müsste ein Kommunikationssystem integriert werden (hier befinden sich schon eine Reihe von Lösungen auf dem Markt), doch das löst nicht das Problem, auch wichtige Töne aus der Umwelt wahrnehmen zu wollen. Zudem wäre es notwendig, ständig Gehörschutz tragen zu müssen, was zu einem starken Akzeptanzproblem führen könnte.

Inear-Kopfhörer (vgl. rechtes Bild in Abbildung 36) lösten viele der bislang aufgetretenen Probleme (Ringwald et al., 2011). Sie konnten in den Vorversuchen (mit fünf männlichen Studenten vgl. Kapitel 3.6.2.2) individuelle Signale übertragen, unter den Kapselgehörschützern getragen werden und wurden als nur wenig störend empfunden. Allerdings erschwerte auch dieses System die Wahrnehmung der Umwelt und es müssen Maßnahmen getroffen werden, um eine dauerhafte Hygiene des Systems im Ohr zu sichern. Der Gehörgang gerät unter dem System ins Schwitzen, was zu Entzündungen führen kann.

Ein vielversprechendes Konzept bieten Signalgeber, die über Bone Conduction-Signale übermitteln (vgl. Abbildung 37). Die generelle Funktion dieses Prinzips wurde bereits in Kapitel 2.2.3 vorgestellt. Die Vorteile bestehen darin, dass das Ohr frei bleibt und so Kommunikation und die Wahrnehmung der Umwelt nicht beeinträchtigt werden. Das Tragen des Systems ist komfortabel, da mehrere Punkte zu einer geeigneten Befestigung zur Verfügung stehen (vgl. Abbildung 9). So steht einer Integration, z.B. in die PSA, nichts im Wege.

#### **Das Bone Conduction-Interface:**

Die beiden in Abbildung 37 dargestellten Bone Conduction-Systeme sind keine selbstentwickelten Systeme. Der linke Kopfhörer stammt von der Firma BHM-Tech Produktionsgesell-

schaft mbH aus Österreich (BHM-Tech Produktionsgesellschaft, 2014). Die Firma ist spezialisiert auf Produkte im Hörakustikbereich und legt einen Schwerpunkt auf die Bone Conduction-Übertragung. Der Kopfhörer ist modular aufgebaut, sodass sich die Signalgeber abtrennen lassen. Das System eignete sich bei den Vorversuchen (Ringwald et al., 2011) (mit fünf männlichen Studenten), um die verschiedenen Positionen am Schädelknochen zu prüfen.

Als Versuchsträger für die abschließenden Versuche wurde das „AfterShokz Sportz 2“ der Firma AfterShokz aus den USA eingesetzt. AfterShokz ist im Entertainmentbereich tätig und vertreibt eine ganze Reihe Bone Conduction-Systeme. Der hier verwendete Kopfhörer gehört zu der neuesten Generation dieser Produkte, die Signalgeber sind flach ausgeführt und werden über einen Nackenbügel am Kopf gehalten. Das System leitet die Vibrationen am Kondylus (vgl. Kapitel 2.2.3; Abbildung 9 an der Position B) kurz vor dem Ohr in den Schädelknochen ein. Die Signale können durch einen eingebauten Verstärker beliebig in ihrer Lautstärke angepasst werden.



Abbildung 37 akustische Signalgeber (Bone Conduction)

Das System zeichnet sich durch die deutlichere Signalübertragung, den sicheren Sitz am Kopf und durch die komfortable Befestigung aus. Für zukünftige Feldversuche muss aber noch das Zusammenspiel mit Kapselgehörschützern verbessert werden, da sich die Abdichtung der Kapseln je nach Bauart mit dem Bone Conduction-System überschneiden kann.

### Die Signale:

Für die Auswahl eines geeigneten Alarmierungs- bzw. Warnsignals wurde ein Vorversuch mit 15 Personen (vier davon weiblich) durchgeführt, um die beiden treffendsten Signale zu finden (Junghans, 2013). 10 Probanden waren im Alter zwischen 20 und 30 Jahren und fünf zwischen 44 und 56 Jahren. Ein Proband aus der älteren Gruppe hatte einen Hörverlust von 30 dB ab einer Frequenz von 4 kHz auf einem Ohr (Junghans, 2013). Die Gestaltung der Signale verlief nach dem Vorgehen der Kapitel 3.3.2.2, 3.3.2.3 und 3.3.2.4. Zusätzlich wurden auch bekannte Signale aus der Praxis im Gleisbau geprüft. Die für die Versuche getroffene Auswahl an Signalen ist im Folgenden kurz aufgelistet (Junghans, 2013).

Geprüfte Alarmierungssignale:

- Rottenwarnsignal Ro3
- Alarmierungssignal nach DIN EN 981
- Gefahrensignal nach (Patterson, 1982)

Geprüfte Warnsignale:

- Rottenwarnsignal Ro1
- Warnsignale nach (DIN EN 981)
- Warnsignal nach (Patterson, 1982)

Am besten schnitten in der Studie die beiden Signale für Alarmierung und Warnung nach DIN EN 981 ab (Junghans, 2013). Sie waren im Zusammenspiel mit dem Bone Conduction-System am besten wahrnehmbar und vermittelten den getesteten Personen eine gute Einschätzung über die Dringlichkeit der Situation.

Die Signale nach Patterson (1982) erscheinen den Probanden als zu komplex, sie müssten vor ihrem Einsatz erst korrekt erlernt werden, um eine sichere Interpretation zu ermöglichen. Sie eignen sich eher für ein sehr komplexes Umfeld mit geschultem Personal, wie dies z.B. in einem Cockpit der Fall ist.

Auch die Rottenwarnsignale, die normalerweise über Mehrklanghörner ausgesendet werden, schnitten nicht sonderlich gut ab. Durch die Wiedergabe mit dem Horn liegen die übermittelten spektralen Informationen nahe zusammen und können Probleme bei der Unterscheidbarkeit erzeugen.

Abschließend sollen die beiden Signale für die finalen Versuche kurz vorgestellt werden:

Um ein Erschrecken zu verhindern, bauen sich beide Signale zu Beginn mit ca. 30 dB pro 0,5 Sekunden auf. Um keine Schädigung herbeizuführen, wurden beide Signale während der Versuche auf eine Lautstärke von ca. 70 dB(A) eingepegelt.

*Alarmsignal nach (DIN EN 981):*

Das sehr dringliche Alarmsignal ist aus zwei Grundfrequenzen ( $F1 = 500 - 1000 \text{ Hz}$ ;  $F2 = 400 - 1000 \text{ Hz}$ ) und einer Oberschwingung ( $F3 = 900 - 1800 \text{ Hz}$ ) aufgebaut. Die Frequenzen liegen damit im gut wahrnehmbaren Bereich (vgl. Kapitel 3.3.2.2). Alle drei Schwingungen sind nach dem Sägezahnmuster aufgebaut und durchlaufen so linear die angegebenen Frequenzen. Die Oberschwingung hat ca. die doppelte Frequenz der Grundschiwingung  $F1$  und ist zusätzlich um 10% versetzt. Dies soll die wahrgenommene Dringlichkeit erhöhen (vgl. Kapitel 3.3.2.4). Die beiden Grundfrequenzen  $F1$  und  $F2$  werden versetzt zueinander wiedergegeben,

d.h. zu Beginn des Signaldurchlaufs sind beide Frequenzen um 100 Hz verschieden, in der Mitte haben beide die gleiche Frequenz und am Ende sind es wieder 100 Hz Differenz. Ein Durchlauf benötigt eine Sekunde. Diese sich ändernde Dissonanz und die Änderungsrate der Frequenzen erhöhen noch einmal die Wahrnehmbarkeit und die Dringlichkeit des Signals (vgl. Kapitel 3.3.2.4).

*Warnsignal nach DIN EN 981:*

Das eher hinweisende Warnsignal besteht aus zwei Schwingungen ( $F1 = 0 - 440$  Hz;  $F2 = 0 - 800$  Hz), die parallel in Segmenten wiedergegeben werden. Die Segmente besitzen eine Länge von 750 ms und 100 ms, dazwischen liegt eine Pause von 80 ms. Am Ende existiert eine weitere Pause von 700 ms. Beide Schwingungen sind sägezahnförmig. Durch die Segmente wirkt das Signal weniger dringlich als die Alarmierung (vgl. Kapitel 3.3.2.4). Auch die niedrigeren Frequenzen haben diese Wirkung und verstärken zusammen mit den Segmenten die Unterscheidbarkeit (vgl. Kapitel 3.3.2.3).

Nach den visuellen und akustischen Prototypen und Signalen sollen im folgenden Kapitel die taktilen Komponenten vorgestellt werden. Den Anfang machen die thermischen Prototypen und Signale.

### **3.6.2.5 Anforderungen an thermische Prototypen**

Wie bereits erwähnt existieren im Bereich der Signalübermittlung über thermische Reize nur wenige Vorkenntnisse. Aus diesem Grund soll die Wahrnehmbarkeit der Signale im Vordergrund stehen (AF10). Auch bei dieser Übertragungsweise der Signale darf es zu keiner Behinderung bei der Ausführung der Arbeitsaufgabe kommen (AF11). Ob bei der Gestaltung thermischer Signale eine Unterscheidbarkeit mehrerer Signale möglich ist (AF12) und ob Informationen über die Dringlichkeit der Situation übertragen werden können (AF13), müssen weitere Versuche zeigen. Deshalb sollen die letzten beiden Anforderungen als Wunsch aufgestellt sein.

Zusammenfassend sind die vier Anforderungen noch einmal im Folgenden dargestellt:

**AF10** Die thermischen Signale müssen gut wahrnehmbar sein.

**AF11** Die betreffende Person darf durch den Einsatz des thermischen Informations- bzw. Warnsystems nicht bei der Ausführung der Arbeitsaufgabe behindert werden.

**AF12** (Wunsch) Die thermischen Signale für Alarmierung und Warnung müssen klar voneinander unterscheidbar sein.

**AF13** (Wunsch) Die Dringlichkeit der Situation muss auch aus den thermischen Signalen hervorgehen.

Im folgenden Kapitel sollen nun der zu den Anforderungen gehörende thermische Prototyp und die Signale vorgestellt werden.

### 3.6.2.6 Thermischer Prototyp und Signale

Für die Realisierung von Prototypen werden sogenannte Peltier-Elemente eingesetzt. Diese Elemente funktionieren nach dem Peltier-Effekt. Bei diesem wird durch die Kontaktstellen zweier verschiedener Leiter elektrischer Strom geleitet. Dadurch wird an einer Kontaktstelle Wärmeenergie aufgenommen und an der anderen Wärmeenergie abgegeben (Sommerlatte, Nielsch, & Böttner, 2007). Bei der Zusammenschaltung vieler dieser Zellen entsteht ein Peltier-Element (vgl. Abbildung 38). Es nimmt auf der einen Seite Wärme auf und gibt sie auf der anderen Seite wieder ab.

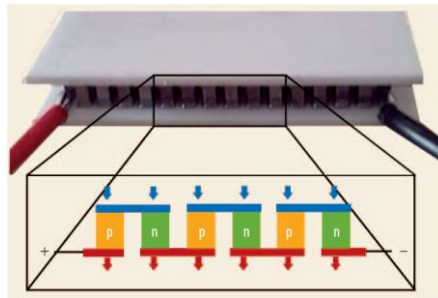


Abbildung 38 Peltier-Element (Sommerlatte et al., 2007)

Die benutzten Peltier-Elemente wurden zusätzlich mit einem Kühlkörper ausgestattet, der es ermöglichte die Wärme schneller abzuführen. Vier dieser Elemente zusammen mit einem Neoprengürtel bilden den Prototyp. Zwei Elemente sind vorne unter der Brust befestigt, zwei weitere im unteren Rückenbereich (vgl. Abbildung 39) (Hartmann & Miller, 2013).

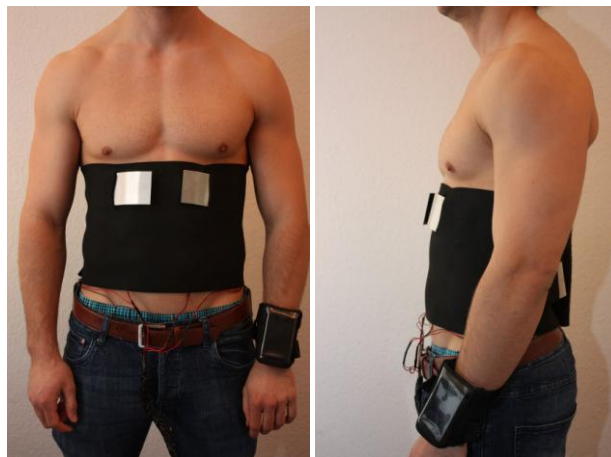


Abbildung 39 Peltiergürtel für die Übermittlung der Kaltreize (Hartmann & Miller, 2013)

Die Seiten der Peltier-Elemente ohne Kühlkörper liegen im angelegten Zustand direkt auf der Haut auf. Jedes einzelne Element hat eine Kontaktfläche von 4 x 4 cm und kann separat angesteuert werden. So ist auch die Gestaltung unterschiedlicher Signale möglich.

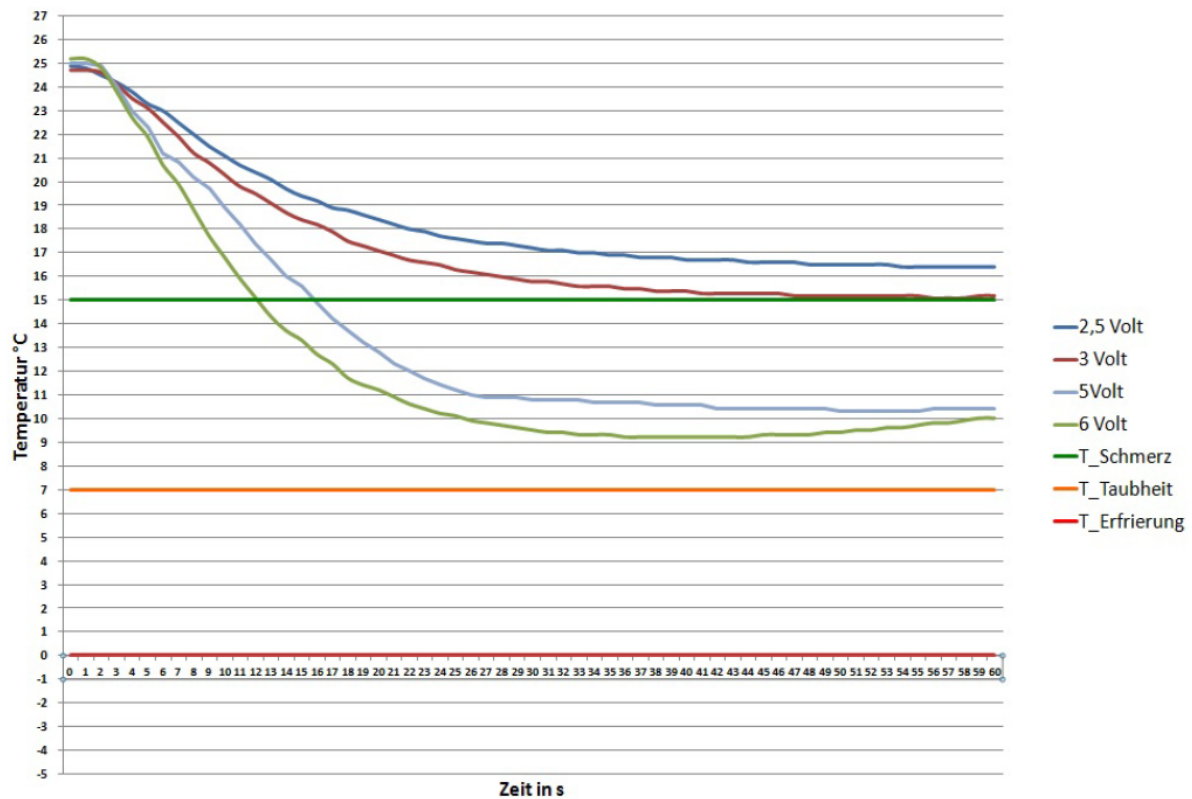


Abbildung 40 Einstellung der Reiztemperatur (Hartmann & Miller, 2013)

Zur Einstellung der richtigen Reiztemperatur wurden die Temperaturverläufe der Peltier-Elemente für unterschiedliche Betriebsspannungen ermittelt. In Abbildung 40 sind sowohl unterschiedliche Temperaturverläufe bei verschiedenen Betriebsspannungen aufgetragen, als auch die Temperaturschwellen für die Empfindung eines Kälteschmerzes, von Taubheit und Erfrierungen (Hartmann & Miller, 2013). Die Betriebsspannung wurde so eingestellt, dass es bei der maximalen Reizdauer zu keiner Empfindung von Schmerz kommen kann.

Zum Testen der Prototypen wurden Versuche mit 14 Probanden (zwei davon weiblich), im Alter zwischen 19 und 35 Jahren, durchgeführt. Keiner davon besaß eine taktile Sensibilitätsstörung (Hartmann & Miller, 2013). Bei Versuchen wurden erste Erkenntnisse gesammelt, die für zukünftige Entwicklungen genutzt werden können. Es gelang noch nicht, verschiedene Signale sicher darzustellen. Allerdings wirkte sich die Anzahl der aktivierten Elemente auf die Wahrnehmbarkeit aus, wie es auch von Campenhausen (1981a) schon dokumentierte. Auch die Umsetzung unterschiedlicher Dringlichkeiten durch pulsierende Signale gelang noch nicht. Diese Signale wurden nur als weniger intensiv und langsamer erkannt.

Um unterschiedliche Signale sicherer zu gestalten, müssen in Zukunft Elemente mit einer größeren Fläche eingesetzt werden. Alternativ dazu ist der Einsatz des Kältesignals als eine Art „letztes Notsignal“ denkbar. Dieses hätte dann nur eine Bedeutung, denn das Signal über alle vier Peltier-Elemente wurde schnell und zuverlässig wahrgenommen. Keine der gemessenen Reaktionszeiten lag dabei über 1,5 Sekunden. In jedem Fall ist noch einige Entwicklungsarbeit zu leisten und auch die Prüfung des Konzeptes in Feldversuchen ist zwingend notwendig.

Nach den thermischen Komponenten folgen nun die Prototypen und Signale, die mittels mechanischer Schwingungen Signale übertragen.

### **3.6.2.7 Anforderungen an taktile Prototypen (mechanische Schwingungen)**

Die Anforderungen der taktilen Signalübertragung über mechanische Schwingungen entsprechen denen für thermische Signale. Die Signale müssen wahrnehmbar sein (AF14) und es darf zu keinen Behinderungen durch die Signalgeber kommen (AF15). Da in diesem Bereich bereits Vorkenntnisse bestehen, sollen die beiden Signale Alarmierung und Warnung gestaltet werden und gut voneinander unterscheidbar sein (AF16). Zusätzlich muss die Dringlichkeit der Situation aus den beiden Signalen hervorgehen (AF17).

Zusammenfassend sind die vier Anforderungen noch einmal im Folgenden dargestellt:

**AF14** Die Signale über mechanische Schwingungen müssen gut wahrnehmbar sein.

**AF15** Die betreffende Person darf durch den Einsatz des taktilen Informations- bzw. Warnsystems (über mechanische Schwingungen) nicht bei der Ausführung der Arbeitsaufgabe behindert werden.

**AF16** Die taktilen Signale über mechanische Schwingungen für Alarmierung und Warnung müssen klar voneinander unterscheidbar sein.

**AF17** Die Dringlichkeit der Situation muss aus den taktilen Signalen über mechanische Schwingungen hervorgehen.

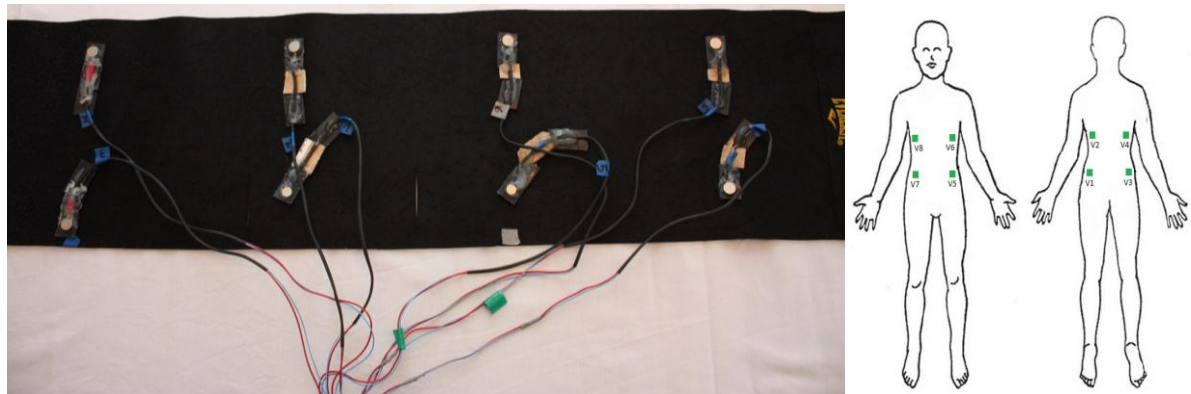
Im folgenden Kapitel sollen nun der zu den Anforderungen gehörende Prototyp und seine Signale vorgestellt werden.

### **3.6.2.8 Taktile Prototyp und Signale (mechanische Schwingungen)**

Realisiert wurde ein breiterer Neoprengürtel mit acht Vibrationsmotoren (jeweils vier am Umfang; in zwei Reihen übereinander). Vier Motoren sind auf dem Rücken angeordnet und vier auf dem Bauch. Jeweils zwei Motoren übereinander werden besser wahrgenommen als acht



Motoren in einer Reihe (Tsukada & Yasumura, 2004). Zwar ist an Bauch und Rücken die Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Schwingungen nicht so ausgeprägt, dies wird aber versucht durch die höhere Anzahl an Motoren auszugleichen. Die Motoren können von ihrer Position auf die betreffende Person angepasst werden. So sitzen die Signalgeber immer an der gleichen Stelle. Die Motoren generieren eine Frequenz von ca. 200 Hz, diese entspricht den empfohlenen Werten aus der Literatur (van Erp, 2002; van Erp & Self, 2008). Abbildung 41 zeigt den fertigen Bauch-Rückengürtel mit den verschiebbaren Motoren.



**Abbildung 41 Bauch-Rückengürtel zur Übertragung der mechanischen Schwingungen (Hartmann & Miller, 2013)**

Bei der Gestaltung der Signale ergaben sich, bis auf die verwendeten Frequenzen, nicht viele Erkenntnisse aus den bisherigen Konzepten. Zum Testen der Prototypen wurden Versuche mit 14 Probanden (zwei davon weiblich) im Alter zwischen 19 und 35 Jahren durchgeführt. Keiner davon besaß eine taktile Sensibilitätsstörung (Hartmann & Miller, 2013). Es handelt sich um dieselben 14 Personen wie aus den Versuchen mit den thermischen Prototypen.

Grundsätzlich sollten bei einem solchen Konzept nur wenige Signale umgesetzt werden. Komplexe Signale ließen sich schlechter identifizieren als einfache. Für das dringliche Alarmsignal sollten alle Signalgeber gleichzeitig pulsierend angesteuert werden. Hier erwiesen sich kurze Folgen als wirksam. Ein „kurz-kurz-lang“ Signal erhielt gute Bewertungen.

Bei dem weniger dringlichen Warnsignal sollten z.B. zwei Bereiche von Signalgebern abwechselnd pulsieren. Denkbare Signale wären eine wechselnde Folge „linke Körperseite-rechte Körperseite“ oder „Vorne-Hinten“.

Leider waren die meisten getesteten Signale zu komplex, so haben sich z.B. umlaufende Signale als schlecht wiedererkennbar erwiesen.

Für zukünftige Versuche sollten noch einmal Signale getestet werden, allerdings nur für die Kategorien Alarmierung und Warnung. Hier könnte auch die Dringlichkeit der Signale über die Anzahl der sich im Einsatz befindlichen Signalgeber getestet werden.



Mit diesem Kapitel schließen die Ausführungen zu den Prototypen zur Erweckung der Aufmerksamkeit. Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit der Übertragung relevanter Informationen.

### **3.6.3 Übermittlung relevanter Informationen**

Wie in Kapitel 3.4 bereits beschrieben, soll die Übertragung relevanter Informationen über die Verwendung von visuellen Displays erfolgen. Dabei erhält der Nutzer eines Informations- bzw. Warnsystems die Möglichkeit, sich ergänzende Informationen zu den erhaltenen Warnungen oder Alarmen zu verschaffen. Es wird davon ausgegangen, dass zu diesem Moment die Aufmerksamkeit bereits auf dem System ruht. Deshalb liegt der Fokus der Signale (in diesem Fall Icons) auf einer klaren Darstellung, die es ermöglicht, die Informationen möglichst schnell zu erfassen.

Die folgenden beiden Kapitel beschreiben die Anforderungen und die Umsetzung einer Informationsübertragung durch die Verwendung von displaybasierenden Icons.

#### **3.6.3.1 Anforderungen an Displays und Icons**

Auch die aufgestellten Anforderungen ergeben sich aus dem Nutzungskontext Gleisbau (vgl. Kapitel 2.4) als mögliches komplexes Anwendungsbeispiel. Viele Anforderungen entsprechen denen aus Kapitel 3.3.1 (Erweckung der Aufmerksamkeit durch eine visuelle Signaldarbietung). Ergänzt werden diese durch Anforderungen, die bei der Entwicklung von Icons von Bedeutung sind.

Nachdem die Aufmerksamkeit auf dem Informations- bzw. Warnsystem liegt, sollte das Display ohne Umstände in den gut wahrnehmbaren Gesichtsbereich (DIN EN 894-2; DIN EN 842; VDI/VDE 3546 Blatt 5) gebracht werden können (AF18). Auch das Display muss auf unterschiedliche Leuchtdichteunterschiede reagieren können, damit Blendungseffekte (DIN 5340; DIN EN 894-2; DIN EN 842; VDI/VDE 3546 Blatt 5) vermieden werden (AF19). Um die Bedeutung der Icons zur Alarmierung und Warnung schnell interpretieren zu können, müssen sie in geeigneten Farben (DIN EN ISO 9241-12; DIN EN 842; DIN EN 981; BGI 523; BGI 650) (AF20) dargestellt werden. Gleichzeitig muss die Unterscheidbarkeit (AF21) der Icons gewährleistet werden (DIN EN ISO 9241-12; DIN EN ISO 14738; DIN EN 842; VDI/VDE 3850 Blatt 1). Ein weiterer Punkt ist die Dringlichkeit (AF22) der Situation, die sich in den Icons widerspiegeln muss (DIN EN ISO 9241-12; DIN EN 842).

Zusammenfassend sollen nun die Anforderungen für die Übermittlung relevanter Informationen mit Hilfe von Icons über ein Display dargestellt werden:

**AF18** Die visuellen Signale über das Display müssen im gut wahrnehmbaren Bereich des Gesichtsfeldes liegen oder schnell dorthin gebracht werden können.

**AF19** Die Icons für Alarmierung und Warnung müssen in geeigneten Farben dargestellt werden.

**AF20** Die Icons für Alarmierung und Warnung müssen klar voneinander unterscheidbar sein.

**AF21** Die Dringlichkeit der Situation muss aus den Icons hervorgehen.

**AF22** Die betreffende Person darf durch den Einsatz des Displays nicht geblendet werden.

Im folgenden Kapitel sollen nun die zu den Anforderungen gehörenden Prototypen und ihre Signale vorgestellt werden.

### **3.6.3.2 Prototypen und Icons zur Informationsdarbietung**

In diesem Kapitel sollen die entwickelten Prototypen kurz vorgestellt und die Auswahl des für die abschließenden Studien genutzten Systems begründet werden. Als Prototyp wurde sowohl ein Head-Mounted Display (HMD) System als auch ein Display am Handgelenk umgesetzt. Anschließend folgt die Vorstellung der entwickelten Icons.

#### **Prototypen:**

**HMD:** Ausgangspunkt für das HMD stellte eine auf dem Markt erhältliche Videobrille dar (Engelberger AG, 2008). Diese verfügte ursprünglich über zwei Mikrodisplays, die mit einem vorgebauten Linsensystem vor den Augen positioniert wurden. Die Auflösung beträgt 640 x 480 Pixel und das projizierte Bild erscheint in angenehmem Abstand mit einer Diagonale von 22,5° vor den Augen. Diese Brille wurde zerlegt und auf ein Display reduziert. Als Trägergestell kam eine handelsübliche Schutzbrille zum Einsatz. Eine speziell entwickelte Haltevorrichtung ermöglichte es, das Display unterhalb des Auges zu positionieren. Sie ermöglichte es weiterhin, das Display flexibel in seiner Ausrichtung zum Auge zu verschieben (vgl. Abbildung 42).

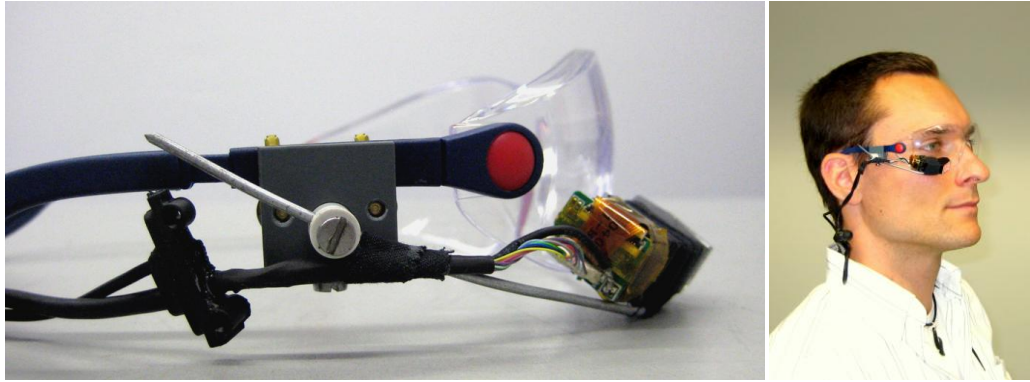


Abbildung 42 HMD kombiniert mit einer Schutzbrille (Kellersmann, 2012)

Aus Abbildung 42 (Kellersmann, 2012) ist bereits zu erkennen, wie filigran die Bauweise einer solchen Brille sein muss, um nicht zu schwer auf der Nase zu lasten und damit als weniger komfortabel empfunden zu werden. Dies ist auch der Grund, warum das Konzept in dieser Form für den Arbeitskontext verworfen wurde. In einem anderen Kontext könnte sich das HMD trotzdem als interessant erweisen.

**Display am Handgelenk:** Als Prototyp für das Display am Handgelenk wurde ein kleines Smartphone (Sony Ericsson - Xperia Mini) mit Touchscreen gewählt. Die Displayabmessungen betragen 42 x 64 mm und es liefert eine Auflösung von 320 x 480 Pixeln.



Abbildung 43 Display am Handgelenk

Für dieses Smartphone wurde eine Halterung entwickelt, die es ermöglicht, das Display möglichst flexibel auszurichten und dabei sicher am Handgelenk zu befestigen (vgl. Abbildung 43). Das Display wird zusätzlich durch eine Folie geschützt, wodurch Eingaben auf dem Touchscreen jedoch nicht behindert werden. Auf dem Smartphone wurde eine Applikation, kurz App, installiert, die die gewünschten Funktionalitäten eines Informations- bzw. Warnsystems sicherstellt. Die Entwicklung dieser App erfolgte mit dem Ziel, Icons darstellen zu können, Töne über ein angeschlossenes Bone Conduction-System abzuspielen und eine Rückmeldung des Nutzers über Gesten zu ermöglichen. Zusätzlich wurde ein neutraler Screen implementiert (vgl. Abbildung 43). Dieser ist grün (DIN EN 981) und beinhaltet eine Digital-

uhr mit Sekundenanzeige. Der Screen dient dazu, dem Nutzer zu signalisieren, dass das System betriebsbereit ist. Dies unterstützt die ständig wechselnde Sekundenanzeige. Jeweils vor und nach einer erfolgreich bestätigten Gefahrenmeldung wird der Screen genutzt, um dem Nutzer zu signalisieren, dass die Situation sicher ist und die Arbeitsaufgabe fortgesetzt werden kann (DIN EN 981). Zur besseren Adaption auf unterschiedliche Lichtverhältnisse dient ein im Smartphone verbauter Lichtsensor dazu, das Display auf unterschiedliche Helligkeiten einzustellen.

In vorab durchgeführten Versuchen mit 18 Probanden (drei davon weiblich) sollte die Eignung des Displays und der beiden Icons bestätigt werden. 17 Probanden waren zwischen 18 und 34 Jahren alt, eine Probandin zwischen 35 und 44. Fünf Probanden hatten eine Brille (drei kurzsichtig, einer weitsichtig und einer beides) (Tondera, 2013). Der Prototyp in der beschriebenen Form erwies sich als geeignet, um mit ihm die abschließenden Versuche durchzuführen. Die gewünschten Informationen konnten schnell abgerufen und anschließend über dasselbe Interface bestätigt werden (vgl. Kapitel 3.6.4.2). Zusätzlich lässt sich eine Displaylösung in Form eines Smartphones problemlos mit den übrigen Warnsignalgebern kombinieren. So kann der Kopfhöreranschluss für die akustischen Warnsignale genutzt werden und über das integrierte W-LAN Modul erfolgt die Steuerung von außen.

### **Icons:**

Die Umsetzung der Icons verlief nahe an den Vorgaben durch die vorher definierten Anforderungen. Wie in Kapitel 3.4.1.2 beschrieben stellen die beiden Farben Rot und Gelb (DIN EN 842) eine wichtige Unterscheidungsgrundlage dar (vgl. Abbildung 44). Diese werden sowohl am äußeren Rand, als auch für die Farbe der geometrischen Umrandung eingesetzt. Da das Display am Handgelenk in einem dunklen Ton gehalten ist, erscheint das jeweilige Icon entweder im dringlichen Rotton oder im Falle einer Warnung im weniger dringlichen Gelbton. Die Icons sind bis auf die symboltragenden weißen Bereiche eher dunkel gehalten, um in dunklen Arbeitsumgebungen nicht blendend zu wirken. Darüber hinaus wurde bei der Gestaltung darauf geachtet, immer die richtigen Kontrastfarben einzusetzen, um die Erkennbarkeit der unterschiedlichen Elemente zu erhöhen. Ein Beispiel dafür ist im Falle des Warnicons die schwarze Trennlinie zwischen dem gelben Quadrat und der weißen Fläche.

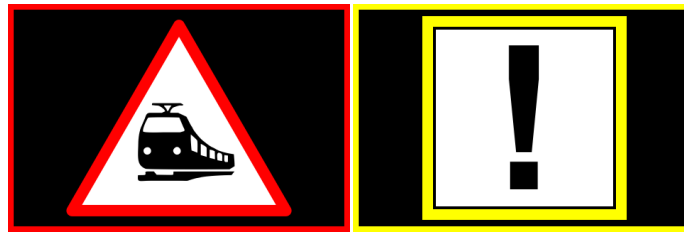


Abbildung 44 Finale Versionen des Alarmierungs- und Warnicons (Tondera, 2013)

Die geometrische Kodierung (vgl. Kapitel 3.4.1.3) äußert sich durch die Umrandung der Symbole. Das Dreieck verkörpert die dringlichere Alarmierungsmeldung und das eher hinweisende Rechteck die weniger dringliche Warnmeldung. Somit sollten auch Personen mit einer Farbfehlsichtigkeit keine Probleme mit der Unterscheidung bekommen.

Wie bereits in Kapitel 3.4.1.3 beschrieben, ist das Symbol innerhalb des Alarmierungsicons auf den Anwendungskontext Gleisbau ausgelegt und daher nicht pauschal auf andere Kontexte übertragbar. Das Ausrufezeichen als Hinweis auf eine Gefahrenstelle ist in dieser Hinsicht auf andere Kontexte übertragbar, wobei geprüft werden sollte, ob ein anderes Symbol nicht besser geeignet wäre. Die beiden Symbole sind einander nicht ähnlich und damit gut unterscheidbar.

Beide Icons konnten bei den anfangs beschriebenen Vorversuchen mit 18 Probanden (Tondera, 2013) bestätigt werden. Sie konnten gut unterschieden und in ihrer Aussage gedeutet werden.

Darüber hinaus sollen Blinkeffekte eingesetzt werden, um das Erkennen der Dringlichkeit zu steigern (vgl. Kapitel 3.4.1.3). Bei der Darstellung des Warnicons kommt eine Frequenz von 0,7 Hz zum Einsatz, dies soll als weniger dringlich wahrgenommen werden. Demgegenüber steht die Symbolisierung des Alarmierungsicons mit einer Frequenz von 2 Hz, was für eine wesentlich höhere Dringlichkeit stehen soll (VDI/VDE 3850 Blatt 1; Früh & Ahrens, 2009). Um wegen des Blinkens die Erkennbarkeit des Icons nicht zu gefährden, wird mit einem Tastverhältnis von 70 % gearbeitet (VDI/VDE 3850 Blatt 1). So verschwindet das Icon immer nur kurz und wird die meiste Zeit auf dem Display angezeigt. In der hier beschriebenen Form sollen die Icons in den abschließenden Versuchen verwendet werden.

In Kapitel 3.6.4 wird nun nach einer geeigneten Form der Rückmeldung auf die vorgestellten Signale und Icons gesucht.

### 3.6.4 Individuelle Rückmeldung durch den Benutzer

Nachdem in Kapitel 3.5 die generelle Vorgehensweise zur Entwicklung eines individuellen Rückmeldungsinterfaces beschrieben wurde, sollen hier die Anforderungen und die Umset-

zung der Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen beschrieben werden. Ziel der Rückmeldung ist es, über das System die korrekte Handlungsintention des Nutzers zu prüfen. Dabei muss der Nutzer zwischen den beiden Gefahrenmeldungen „Alarm“ und „Warnung“ differenzieren können.

In Kapitel 3.6.4.1 werden die grundlegenden Anforderungen festgelegt und anschließend drei verschiedene Konzepte einer Rückmeldefunktion vorgestellt (vgl. Kapitel 3.6.4.2). Dabei stellt das dritte Konzept gleichzeitig auch die finale Umsetzung für das Rückmeldungsinterface dar. Dieses beinhaltet die gewonnenen Erfahrungen aus den ersten zwei Konzepten und soll für die abschließenden Versuche genutzt werden.

#### **3.6.4.1 Anforderungen an eine individuelle Rückmeldung**

Bei der Definition der Anforderungen wird berücksichtigt, dass die Rückmeldefunktion in einem noch sehr prototypischen Stadium umgesetzt werden kann. Es geht darum, grundsätzliche Gestaltungsausprägungen zu betrachten und für die abschließenden Versuche auszuwählen. Der Gleisbau als ausgewähltes Anwendungsbeispiel stellt in diesem Zusammenhang einen recht komplexen Arbeitskontext dar, hier sollen die Umgebungsbedingungen wie beispielsweise Nässe, Schmutz oder Staub nicht betrachtet werden. Es geht um die funktionelle Gestaltung des Interfaces und nicht um die Anpassung an Umgebungsbedingungen.

Es sollen drei verschiedene Varianten eines Rückmeldeinterfaces umgesetzt werden. Klar im Vordergrund steht die effiziente und effektive Bedienung des Gerätes (DIN EN ISO 9241-210). Um bei den Anforderungen strukturiert vorgehen zu können, sollen die Grundsätze der Dialoggestaltung (DIN EN ISO 9241-110) beachtet werden.

Die Aufgabenangemessenheit ist wichtig, um den Kontext im Auge zu behalten, in dem das Rückmeldeinterface eingesetzt wird (AF23). Hier sollte z.B. berücksichtigt werden, dass die Rückmeldung schnell gehen sollte, um genug Zeit zum Verlassen der Gefahrenstelle übrig zu haben. Das Interface sollte in einem hohen Maße selbstbeschreibungsfähig sein, um möglichst keine Unklarheiten aufzuwerfen (AF24). Das heißt die Dialoge oder Darstellungen der Rückmeldung müssen bereits Aufschluss über die erforderliche Handlung bieten. Es muss sich zu jedem Zeitpunkt erwartungskonform verhalten (AF25), darum muss das System auf jede Eingabe durch den Nutzer reagieren und so nachvollziehbar den Status der Rückmeldung widerspiegeln. Außerdem ist es ein klares Ziel, das System leicht erlernbar zu gestalten (AF26). Das Warnsystem muss bereits nach einer kurzen Einweisung für die betroffenen Personen verständlich sein. Es muss je nach Situation steuerbar sein, um auch in eiligen Situationen keine Fehler zu provozieren (AF27). Hier müssen z.B. dem Nutzer jederzeit alle Eingabe-

beoptionen nachvollziehbar präsentiert werden. Bei Eingabefehlern muss das Interface den Nutzer aufmerksam machen, um keine falschen Reaktionen zu verursachen (AF28). Dies könnte z.B. durch eine klare Kennzeichnung des Fehlers geschehen, sodass der Nutzer weiß, worauf er bei der erneuten Eingabe zu achten hat. Außerdem wird das System von unterschiedlichsten Nutzern verwendet und sollte daher individualisierbar gestaltet sein (AF29). Hier wäre z.B. die Einstellbarkeit der Fingerdicke wichtig, um nicht versehentlich mehrere Bedienflächen gleichzeitig zu aktivieren (DIN EN ISO 9241-110).

Darüber hinaus muss das Interface gegen eine versehentliche Bedienung geschützt sein (AF30), um nicht ohne das Wissen des Nutzers eingehende Meldungen zu bestätigen.

Zusammenfassend sollen nun die Anforderungen für das Rückmeldeinterface noch einmal übersichtlich dargestellt werden:

**AF23** Aufgabenangemessenheit

**AF24** Selbstbeschreibungsfähigkeit

**AF25** Erwartungskonformität

**AF26** Lernförderlichkeit

**AF27** Steuerbarkeit

**AF28** Fehlertoleranz

**AF29** Individualisierbarkeit

**AF30** Schutz gegen unbeabsichtigte Bedienung

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen sollen nun mögliche Konzepte vorgestellt werden.

### **3.6.4.2 Prototypen eines Rückmeldungsinterfaces**

Im folgenden Kapitel sollen die drei verschiedenen Rückmeldungsinterfaces näher vorgestellt werden.

#### **Einfache Rückmeldung über physikalische Tasten**

Als einfachste Form eines Rückmeldungsinterfaces wurde die Lösung über farbig gestaltete Tasten betrachtet (vgl. Abbildung 45) (Heidl, 2011). Das Interface muss ergänzend zu dem Display am Handgelenk getragen werden oder ist in einem späteren Prototyp mit in das Display zu integrieren. Die Farben entsprechen den Signalfarben über die LED-Brille und der gestalteten Icons. Die dritte Taste (blau) sollte anfangs mit einer zusätzlichen Warnmeldung

verknüpft werden, was sich als nicht zielführend herausstellte und im Folgenden nicht weiter betrachtet wird.

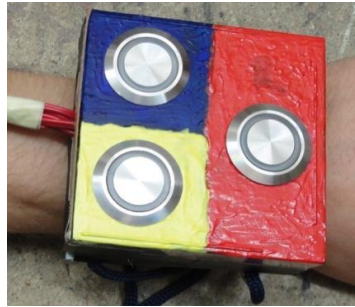


Abbildung 45 Rückmeldung über physikalische Tasten (Heidl, 2011)

Das Interface ist robust und könnte in einem Kontext wie dem Gleisbau genutzt werden. Durch die farbige Gestaltung lassen sich die Tasten zwar recht gut den Signalen zuordnen, allerdings unterstreicht dies nur wenig die Bedeutung der Rückmeldung. Auch die unterschiedlich großen farbigen Bereiche erwiesen sich als wenig hilfreich. Das Erlernen des Systems ist einfach, da vom Nutzer nur ein Farbvergleich erwartet wird. Erwartungskonform endete die Warnsignalübertragung mit der Betätigung der richtigen Taste, wobei der Nutzer die entsprechende Taste auch durch schnelles Ausprobieren finden kann. Eine wirkliche Identifikation der Meldung kann somit leicht umgangen werden. Von Fehlertoleranz kann schwer gesprochen werden, da jede Fehleingabe über das Display signalisiert werden müsste. Der individuelle Einsatz des Systems wäre nicht ratsam, da speziell Nutzer mit einer Farbfehlsichtigkeit nur noch die Position der Taste als Anhaltspunkt hätten. Ein weiteres Problem stellt das versehentliche Bedienen des Interfaces dar. Bereits das Anstoßen an eine Ecke kann eine Taste betätigen. Ein zusätzlicher Schutz der Tasten müsste demnach vorgesehen werden.

Zusammenfassend ist dieses Interface nur für sehr einfache und nicht sicherheitskritische Anwendungen geeignet und wird somit nicht für die abschließenden Versuche weiterbetrachtet.

### **Rückmeldung über eine Eingabekombination auf einem Touchscreen**

Ziel dieses Rückmeldungsinterfaces ist es, das Abrufen der Informationen und die Rückmeldung am selben Ort vorzunehmen. Dieses Vorgehen erfordert es, das Display am Handgelenk durch einen Touchscreen zu ergänzen. Nach dem Abrufen der Icons auf dem Display aktiviert der Nutzer durch eine Berührung des Displays vier Bereiche in den Ecken. Diese Bereiche müssen anschließend in der richtigen Reihenfolge aktiviert werden, um die Rückmeldung auf die Information bzw. Warnung abzuschließen (vgl. Abbildung 46).





Abbildung 46 Rückmeldung über eine Eingabekombination

Durch diese Art der Rückmeldung finden die Darstellung der Gefahrenmeldungen und die eigentliche Rückmeldung auf demselben Display statt. Der Nutzer sieht sogar bei der Eingabe noch das dargestellte Icon. Hierdurch wird es wahrscheinlicher, dass er die Bedeutung der Gefahrenmeldung auch wirklich wahrnimmt (Klusendick, 2007).

Die Kombination ist durch die eingeblendeten Zahlen leicht erlernbar und auch für Ungeübte selbsterklärend. Lediglich die Logik, also das Verfolgen der Zahlenreihenfolge, muss im Vorfeld verstanden sein. Eine versehentliche Eingabe ist durch die Nutzung einer Kombination unwahrscheinlich.

Problematisch ist bei dieser Methode der Rückmeldung, das Verständnis des Nutzers für unterschiedliche Gefahrensituationen zu generieren. Mehrere Kombinationen für verschiedene Gefahrenmeldungen führten zu Falscheingaben, da die Kombination nicht direkt mit den Icons oder einer sonstigen Information zu verknüpfen sind. Das Auswendiglernen von mehreren ähnlichen Kombinationen führte zu Verwechslungen. So wurde letztlich nur eine Kombination zur Rückmeldung genutzt. Diese fehlende Information einer spezifischen Rückmeldung für unterschiedliche Gefahrenmeldungen führte zur Entwicklung einer Rückmeldung durch die Nutzung von Gesten. Außerdem muss das Display dem Kontext angepasst werden, hier ist besonders der Schutz vor Stößen oder Verschmutzung zu beachten.

### **Rückmeldung über die Nutzung von Gesten**

Die Rückmeldefunktion über den Einsatz von Gesten wurde nach den beiden zuvor vorgestellten Konzepten entwickelt. Hier fließen die bereits gewonnenen Erkenntnisse mit ein. Zum einen soll eine individuelle Rückmeldung für die verschiedenen Gefahrenmeldungen möglich sein. So ist es für das Informations- bzw. Warnsystem möglich, auf die abgegebene Rückmeldung geeignet zu reagieren. Zum anderen soll die Rückmeldung auf dem Display am Handgelenk ablaufen, um den Erhalt der Information und die Rückmeldung über ein Interface abzuwickeln.

Gelöst wurde dies durch die Nutzung von spezifischen Gesten, wobei einer Geste jeweils eine Gefahrenmeldung zugeordnet ist. Eine Expertenbefragung (Sarodnick & Brau, 2011) sollte

Aufschluss über die richtige Auswahl einer Geste liefern. Es nahmen sechs Experten mit Erfahrung in Produktergonomie und Interfacegestaltung teil. Als Ergebnis erwies sich die Eingabe einer einfachen und geschlossenen geometrischen Form als weniger fehleranfällig als z.B. die Eingabe eines skizzierten Warnhorns oder eines aus zwei Elementen bestehenden Ausrufezeichens (Yilmaz, 2014). Diese Gesten orientieren sich an der geometrischen Kodierung der Icons (vgl. Kapitel 3.6.3.2). Das heißt zur Bestätigung der Alarmmeldung ist die Eingabe eines Dreiecks notwendig und bei einer Warnmeldung muss ein Viereck eingegeben werden (vgl. Abbildung 47 (Ballweg, 2013)).

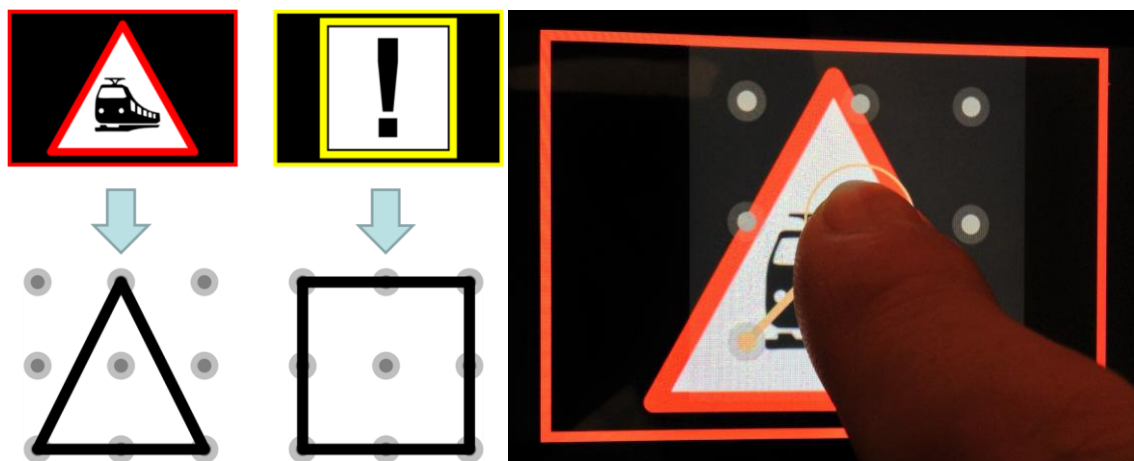


Abbildung 47 Rückmeldung über die Nutzung von Gesten (rechts (Ballweg, 2013))

Wie in Abbildung 47 (Ballweg, 2013) ebenfalls dargestellt, werden die geometrischen Gesten mit der Hilfe eines Grids eingegeben. Ein Grid beschreibt ein Raster von Punkten, die jeweils mit dem Finger zu verbinden sind. Der Nutzer zieht so eine hellrote Linie von Punkt zu Punkt, die schließlich die gewünschte Form ergeben soll. Unterstützend erfolgt beim Passieren jedes Punktes eine kurze Animation, um dem Nutzer dieses Andocken zurückzumelden. Entspricht die Eingabe am Ende der geforderten Form, leuchtet diese grün auf. Bei einer Falscheingabe färbt sich die eingegebene Form rot ein, anschließend verschwindet die Linie und das System erwartet die erneute Eingabe.

Die Eingliederung dieser Form der Rückmeldung erfolgt im Anschluss an die Darstellung der blinkenden Icons. Der Nutzer aktiviert durch Antippen des Displays das Grid. Dabei bleibt das Icon im Hintergrund, wird aber etwas ausgegraut, um das Grid, das nun im Vordergrund erscheint, deutlicher hervorzuheben. Nun muss der Nutzer die richtige Geste eingeben. Gelingt dies, stoppt das System alle Warnsignalgeber und der neutrale Screen erscheint. Kommt es zu einer falschen Eingabe, verschwindet die rot dargestellte falsche Geste und der Nutzer muss erneut eine Eingabe vornehmen.

Die Eingabe von Gesten über die Nutzung eines Grids ist bei vielen Handyherstellern ein gängiges Verfahren zum Entsperren des Bildschirms und sollte daher recht einfach zu erlernen sein. Die Rückmeldung über die bekannten geometrischen Formen ist für den geschulten Nutzer erwartungskonform und gibt die Möglichkeit einer spezifischen Rückmeldung. Durch die Darstellung der Icons im Hintergrund hat der Nutzer auch nach einer Fehleingabe die Möglichkeit, die korrekte Information abzurufen und damit selbstbeschreibend die richtige Form zu bestätigen.

Durch den Einsatz dieser Form eines Rückmeldungsinterfaces konnten die meisten gesetzten Anforderungen erreicht werden. Daher wird dieses Konzept auch in den abschließenden Studien verwendet. Im Hinblick auf den Arbeitskontext Gleisbau sollte lediglich das Interface selbst besser vor Stößen und Verschmutzung geschützt werden.

Damit endet die Vorstellung der Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen. Im nächsten Schritt erfolgt die Vorstellung des Versuchskonzeptes, mit dem das hier entwickelte System abschließend getestet werden kann.

## 4 Entwicklung eines Versuchskonzeptes

Nachdem in Kapitel 3 ein funktionsbereites Informations- bzw. Warnsystem entwickelt wurde, beschäftigt sich Kapitel 4 mit der Entwicklung eines Versuchskonzeptes, das dafür geeignet ist, die vorliegenden Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen zu testen. Diese Evaluation ist nur eingeschränkt für die umgesetzten Gestaltungslösungen möglich und kann nicht die generelle Eignung aller Kombinationen der Gestaltungshinweise aus Kapitel 3 gewährleisten.

Parallel zur Entwicklung der Prototypen wurde die Entwicklung des Versuchskonzeptes für Informations- und Warnsysteme in sicherheitskritischen Arbeitskontexten ebenfalls nach dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess (DIN EN ISO 9241-210) durchgeführt. So konnten auch hier einzelne Aspekte, wie beispielsweise die Wahl einer geeigneten Arbeitsaufgabe, sukzessive verbessert werden.

In Kapitel 4.1 soll zunächst das grundsätzliche Konzept der geplanten Versuche erarbeitet werden. Es wird beschrieben, warum sich Laborstudien besonders anbieten und in welchem Rahmen diese durchzuführen sind. In Kapitel 4.2 werden die Bedingungen während der Versuche diskutiert, hier folgen Ausführungen über die Beschaffenheit des Labors oder geplante Störeinflüsse (z.B. Beleuchtungszustand). Kapitel 4.3 beschäftigt sich mit den beiden geplanten Arbeitsaufgaben und Kapitel 4.4 beschreibt die Auswahl des Probandenkollektivs. In Kapitel 4.5 sollen die verwendeten Methoden zur Erhebung der objektiven und subjektiven Ergebnisse aufgeführt und auf Besonderheiten hingewiesen werden. Abschließend erläutert Kapitel 4.6 die Abläufe der beiden geplanten Studien. Hier wird z.B. die Verteilung der zu übermittelnden Gefahrenmeldungen beschrieben.

Um einen schnellen Einstieg in das Kapitel zu ermöglichen, beginnt das folgende Kapitel damit, das grundsätzliche Konzept der Versuche zu erläutern.

### 4.1 Grundsätzliches Konzept

In diesem Kapitel soll das Konzept der durchgeführten finalen Versuche verdeutlicht werden. Durch die Versuche sollen die in Kapitel 3.2 vorgestellten Forschungsfragen beantwortet werden. Um eine geeignete Form für die Versuche auswählen zu können, müssen zunächst die relevanten Umgebungsfaktoren und das zu testende System näher betrachtet werden.

Der Arbeitskontext Gleisbau ist von vielfältigen Umgebungsfaktoren wie z.B. wechselnde Lichteinflüsse, Störgeräusche und teils starke Vibrationen geprägt. Dabei findet die Arbeit unter Einfluss von Feuchtigkeit, wechselnden Temperaturen und mit Auftreten von Schmutz

und Staub statt. Die Betrachtung aller Faktoren ist innerhalb dieser Arbeit nicht möglich. Bei den entwickelten Konzepten mit ihren Prototypen und Signalen handelt es sich noch um sehr sensible Komponenten. Dies hat zur Folge, dass der Fokus in dieser Entwicklungsstufe auf die geeignete Übertragung der Signale gelegt wurde. Deshalb sollen in die Betrachtung dieser Arbeit nur ausgewählte Bedingungen einfließen, wie die Beleuchtungsstärke und der Störschallpegel sowie die Arbeitsaufgabe. Laborstudien mit konstanten Umgebungsbedingungen ermöglichen diese gezielte Betrachtung der Signalübertragung und Interaktion mit dem System. Hier können die Umgebungsbedingungen im Vorfeld bestimmt und Ereignisse wie z.B. das Auftreten der Gefahrenmeldungen gesteuert werden. Gleichzeitig ermöglichen Laborstudien eine Wiederholung der Versuche mit den gleichen Bedingungen (Huber, Meyer, & Lenzen, 2014; Roth, Heidenreich, & Holling, 1999). Dadurch können Aussagen zu Ursache und Wirkung getroffen werden, die zur Beantwortung der Forschungsfragen notwendig sind.

Um dies erreichen zu können, wird ein Vorgehen über zwei verschiedene Laborstudien gewählt. Die erste Studie soll vor allem Erkenntnisse im Bereich der Interaktion mit dem System liefern. Hier sitzen die Probanden am Tisch, bearbeiten eine eher feinmotorische Arbeitsaufgabe und werden dabei über die Methode der Blickbewegung (Sarodnick & Brau, 2011) beobachtet. In unregelmäßigen Abständen erhalten die Probanden Alarm- bzw. Warnsignale und sollen die korrekte Rückmeldung über das Rückmeldungsinterface geben.

Die zweite Studie soll näher an den Arbeitskontext Gleisbau gerückt werden. Hier muss der Proband körperlich in unterschiedlichen Haltungen arbeiten. Die Arbeitsobjekte sind so dimensioniert, dass sie mit beiden Händen gehandhabt werden müssen. Es gibt sowohl einen definierten Störschallpegel als auch eine vorbestimmte Beleuchtungsstärke. Das Informations- bzw. Warnsystem wird als Ganzes beurteilt.

Beide Studien werden begleitet durch die Aufzeichnung von Zeiten als objektive Ergebnisse sowie Fragebögen (Roth et al., 1999), die jeweils zum Abschluss der Studie durch die Probanden auszufüllen sind.

In den folgenden Kapiteln sollen nun die Einzelheiten zu den Versuchen genauer erläutert werden, den Anfang machen die Versuchsbedingungen.

## 4.2 Versuchsbedingungen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Bedingungen während der Versuche. Sie beinhalten sowohl die konstant gehaltenen Umgebungsbedingungen als auch den räumlichen Aufbau. Es

folgen nun die Erläuterungen zu den einzelnen Parametern. Dabei sollen die beiden Studien nacheinander vorgestellt werden.

### **Erste Studie:**

Die erste Studie hatte das Ziel, die Interaktion mit dem Display am Handgelenk zu analysieren und die akustischen Signale zu testen. Die LED-Brille soll in dieser Studie gezielt nicht eingesetzt werden, um den Probanden die Möglichkeit zu geben, sich bei der Bewertung rein auf die akustischen Signale konzentrieren zu können. Durch dieses Vorgehen war es nicht notwendig, besondere Beleuchtungsbedingungen zu schaffen. Auch ständige Haltungswechsel würden die Beobachtung der Interaktion mit dem Display erschweren. Deshalb fiel die Wahl auf ein kleines Labor mit Tageslichtbedingungen (vgl. Abbildung 48). Der Proband sitzt in der Nähe des Fensters und ist durch eine Trennwand vom Versuchsleiter getrennt. Auf dem Schreibtisch vor ihm befinden sich ausschließlich die Materialien zur Bearbeitung der Arbeitsaufgabe. Der Raum war ruhig gelegen, sodass die einzigen Geräusche durch die Bearbeitung der Arbeitsaufgabe verursacht wurden.



**Abbildung 48 Labor erste Studie**

### **Zweite Studie:**

Für die zweite Studie war ein größerer Platzbedarf notwendig. Mit dem Ziel, das Informations- bzw. Warnsystem in seinem gesamten Ablauf (Erweckung der Aufmerksamkeit bis Rückmeldung durch den Nutzer) und unter praxisnäheren Arbeitsbedingungen analysieren zu können, wurde ein großes Labor benötigt. Außerdem sollte es möglich sein, die Beleuchtungsbedingungen sowie den Störschallpegel steuern zu können.



Abbildung 49 Labor zweite Studie

Abbildung 49 zeigt das Labor der zweiten Studie. Es handelt sich um einen Raum ohne Tageslichteinfluss. Die Studie soll ausschließlich in einer hellen Umgebung stattfinden. Dies wurde aufgrund eines Vorversuchs festgelegt, bei dem sieben männliche Probanden im Alter zwischen 19 und 28 Jahren visuelle Signale über die LED-Brille erhielten (Blümel, 2014). Es bestätigte sich, dass die Wahrnehmung der adaptierten visuellen Signale in einer dunklen Arbeitsumgebung (50 Lux – Mindestwert auf Gleisbaustellen in Deutschland (BGI 5081)) kein Problem darstellt. Auch Blendungseffekte, die die Orientierung behindern oder Probleme bei der Ausübung der Arbeitsaufgabe auslösen könnten, blieben aus. Deshalb sollte eine möglichst helle Arbeitsumgebung mit gleichmäßiger Ausstrahlung geschaffen werden. Mit Hilfe der Raumbeleuchtung und einem zur Decke gerichteten Baustrahler (vgl. Abbildung 49) konnte im Arbeitsbereich eine Beleuchtungsstärke von 2300 Lux erreicht werden.

Der Störschall wurde durch das Geräusch eines arbeitenden Kompressors realisiert, der auf Baustellen den Luftdruck für viele Arbeitsmaschinen liefert. Die aufgestellten Lautsprecher lieferten im Arbeitsbereich eine konstante Lautstärke von 60 dB (A). Wie bereits im Vorfeld zu erwarten war, stellte dies eine Geräuschkulisse dar, bei der keiner der Probanden nach einstündiger Versuchszeit über Beschwerden klagte. Trotzdem wirkte das Störgeräusch ablenkend und wirkte genau wie auf realen Baustellen den akustischen Warnsignalen (ca. 70 dB (A)) entgegen.

Zur Ausführung der Handlungsreaktion in Folge des Alarmierungssignals wurde genau wie auf realen Gleisbaustellen ein Sicherer Bereich festgelegt (näheres in Kapitel 4.5). In Abbildung 49 ist dieser durch die durchgezogene Markierung am Boden zu erkennen. Zusätzlich wurde der Arbeitsbereich markiert, um die Umgebungsbedingungen während des Versuchs konstant zu halten. Alle benötigten Materialien zur Bearbeitung der Arbeitsaufgabe waren ebenfalls in diesem Bereich angeordnet.

Nach der Beschreibung der Versuchsbedingungen folgt nun die Auswahl einer geeigneten Arbeitsaufgabe.

### 4.3 Arbeitsaufgabe

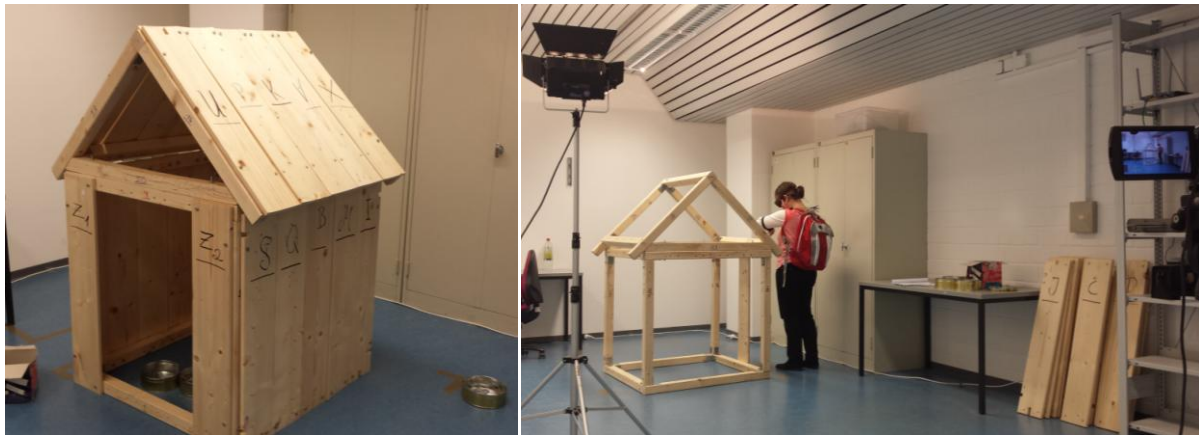
Bei der Wahl einer geeigneten Arbeitsaufgabe traten zwei grundlegende Probleme auf: geistige Unterforderung oder praxisuntaugliche Arbeitsbedingungen. Wäre die Aufgabe mit körperlicher Arbeit verbunden gewesen (z.B. Bohren oder Schleifen von Werkstücken), dann hätte die Gefahr bestanden, dass die Probanden geistig wenig gefordert worden wären und letztendlich schon auf das Erscheinen einer Gefahrenmeldung gewartet hätten. Wäre die Aufgabe auf der anderen Seite geistiger Natur gewesen (z.B. das Lösen eines Labyrinths), hätten keine praxistauglichen Aussagen im Kontext des Gleisbaus getroffen werden können.

So wurden während der Iterationsstufen der innerhalb dieser Arbeit beschriebenen Vorstudien viele Arbeitsaufgaben ausprobiert, wobei es Ziel war, eine motivierende Aufgabe zu finden, die auf geeignete Weise von den auftretenden Gefahrenmeldungen ablenken konnte. Die abschließenden drei Vorversuche zeigten, dass Montagetätigkeiten, die nach einem festen Bauplan erfolgten, am besten geeignet sind (Blümel, 2014; Rabke, 2014; Yilmaz, 2014). Hier hatten die Probanden eine Tätigkeit mit definiertem Anfang und Ende. Anders als z.B. bei endlosen Bohrtätigkeiten konnte auf ein Ziel hingearbeitet werden, was die Motivation, eine Arbeitsaufgabe mit konstanter Aufmerksamkeit zu bearbeiten, deutlich steigerte.

Aus diesem Grund fiel die Auswahl der Arbeitsaufgabe für die erste Studie auf einen LEGO-Bausatz, bei dem der Proband die letzten Arbeitsschritte beim Zusammenbau eines LKWs tätigen musste. Die Arbeitsschritte waren so bemessen, dass der Proband für rund 45 Minuten zu arbeiten hatte. Die Fertigstellung des Modells sollte eine zusätzliche Motivation bieten. Der Bausatz kann bequem am Tisch gebaut werden und stört nicht die Interaktion mit dem Display am Handgelenk. Zusätzlich kann die Kamera der Blickbewegungsbrille alle Aktionen dokumentieren (Sarodnick & Brau, 2011).

Für die zweite Studie wurde eigens das Modell einer Holzhütte entwickelt, das mit Hilfe eines Bauplanes errichtet werden kann. Diese Hütte (vgl. Abbildung 50) mit quadratischer Grundfläche hat eine Breite von ca. einem Meter und ist ca. 1,70 Meter hoch. Alle Fügstellen wurden als Schrauben-Muttern-Verbindungen ausgeführt, die beliebig viele Aufbauvorgänge zuließen.





**Abbildung 50 Arbeitsaufgabe - Bau einer Holzhütte**

Der Bauplan gab jeden Montageschritt als schriftliche Anweisung mit der Unterstützung durch Fotos wieder. Die Schritte waren so gewählt, dass sich kein festes Schema ergab, sondern jedes Teil vor seinem Einbau auf seine korrekte Position geprüft werden musste. Die Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben wurden in Kisten aufbewahrt, die der Proband nach eigenem Belieben arrangieren konnte. Das Holzmaterial lag ungeordnet auf einem Tisch bzw. lehnte an der Wand. Die benötigte Zeit zum Zusammenbau betrug mindestens eine Stunde, was als zeitlicher Rahmen für die Studie gesetzt wurde. Der Zusammenbau erforderte körperliche Arbeit in unterschiedlichen Haltungen, ein hohes Maß an kognitiven Vorgängen, um keine Fehler zu machen und die Motivation, schöpferisch zielgerichtet tätig zu sein.

Nach der Beschreibung der Arbeitsaufgabe soll nun die Auswahl der Probanden beschrieben werden.

#### 4.4 Wahl der Probanden

In diesem Kapitel soll die Wahl einer geeigneten Probandengruppe erläutert werden, wobei darauf zu achten ist, dass die Ergebnisse nicht durch eine ungeeignete Wahl unnötig verfälscht werden. Getestet werden sollen die Signalübertragung durch die Prototypen und die Interaktion mit dem Rückmeldungsinterface. Dies geschieht während der Ausführung einer Arbeitsaufgabe (vgl. Kapitel 4.3) und unter den ausgewählten Umgebungsbedingungen (vgl. Kapitel 4.2).

Die Wahl fiel auf männliche Probanden im Alter zwischen 18 und 40 Jahren. Alle sollten keine Vorkenntnisse in Bezug auf den Gleisbau besitzen. Dies ermöglicht eine unvoreingenommene Herangehensweise an das noch sehr prototypische System. Zusätzlich verhindert diese Herangehensweise eine Verfälschung der Ergebnisse durch ein System, das noch unzureichend an die Umgebungsbedingungen im Kontext des Gleisbaus angepasst ist (Sarodnick

& Brau, 2011). Ergänzend sollte an der zweiten Studie eine kleinere Gruppe weiblicher Probanden derselben Altersgruppe teilnehmen, da der Einsatz des Informations- bzw. Warnsystems auch auf andere Arbeitskontexte übertragbar sein soll und damit für beide Geschlechter nutzbar gestaltet werden muss. Die Auswertung der beiden Geschlechter erfolgt separat. Im Anschluss werden die Ergebnisse verglichen. Kommt es zwischen den beiden Geschlechtern zu keinen auswertbaren Abweichungen, fließen die Ergebnisse in einer gemeinsamen Auswertung zusammen. Die Signale werden derart deutlich dargestellt, dass es bei der Wahrnehmung der vorliegenden Signale keine Unterschiede geben dürfte. Diese geschlechtsspezifischen Unterschiede liegen mehr im Bereich der feinen Unterscheidung von Reizen (Arolt, 2007), z.B. können Frauen Farbnuancen eines Farbbereiches besser unterscheiden als Männer.

Die Rekrutierung der Probanden geschah über Aushänge an der Hochschule und an Studentenwohnheimen, sowie durch die Nutzung von Kontakten im Bekanntenkreis der Versuchsleiter.

Tabelle 9 zeigt die demographischen Daten aus der ersten Studie mit ausschließlich männlichen Probanden.

**Tabelle 9 Demographische Daten erste Studie**

<b>Variable</b>	<b>Ausprägung</b>	<b>Wert</b>
Geschlecht	Männlich/Weiblich	31/0
Alter (Jahren)	Mittelwert/Standardabweichung/Median	25,39/3,93/26
Händigkeit	Rechts-/Linkshänder	29/2
Höchster Bildungsabschluss	Volks-/Hauptschulabschluss	0
	Realschule	2
	Fachhochschulreife oder höher	29
	Keine Angabe	0
Anstellung	Student	19
	Angestellter	12
Erfahrung mit Touchscreens und Smartphones	Selten - Telefonieren und SMS	0
	Häufig - Telefonieren, SMS und E-Mail	11
	Häufig - Telefonieren, SMS, E-Mail und Spiele	20
Erfahrung mit Entsperrmustern bei Smartphones	Ja/Nein	15/16
Farbfehlsichtigkeit oder anderer Fehlsichtigkeit	Ja/Nein	3/28
Brille oder Kontaktlinsen vorhanden	Ja/Nein	20/11
Hörschäden	Ja/Nein	1/30
Erfahrung durch andere Studien in diesem Bereich	Ja/Nein	5/26

Tabelle 10 enthält die demographischen Daten zur zweiten Studie. Hier nahmen sowohl männliche als auch weibliche Probanden teil.

**Tabelle 10 Demographische Daten zweite Studie**

Variable	Ausprägung	Wert
Geschlecht	Männlich/Weiblich	32/6
Alter (Jahren)	Mittelwert/Standardabweichung/Median Keine Angabe	27,14/4,37/27,5 2
Händigkeit	Rechts-/Linkshänder	36/2
Höchster Bildungsabschluss	Volks-/Hauptschulabschluss Realschule Fachhochschulreife oder höher Keine Angabe	1 3 30 4
Anstellung	Student Angestellter Keine Angabe	21 13 4
Erfahrung mit Touchscreens und Smartphones	Selten - Telefonieren und SMS Häufig - Telefonieren, SMS und E-Mail Häufig - Telefonieren, SMS, E-Mail und Spiele	2 12 24
Erfahrung mit Entsperrmustern bei Smartphones	Ja/Nein	13/25
Farbfehlsichtigkeit oder anderer Fehlsichtigkeit	Ja/Nein	3/35
Brille oder Kontaktlinsen vorhanden	Ja/Nein	20/18
Hörschäden	Ja/Nein	1/37
Erfahrung durch andere Studien in diesem Bereich	Ja/Nein	18/20

Nach der Auswahl der Probanden folgt nun eine Erläuterung der verwendeten Methoden zur Dokumentation bzw. Auswertung der Ergebnisse.

## 4.5 Methoden zur Erhebung der Ergebnisse

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Methoden zur Erhebung der Ergebnisse. Ziel der Erhebung ist die Beantwortung der in Kapitel 3.2 aufgestellten Forschungsfragen. Unterschieden werden sollen Methoden zu subjektiv und objektiv erhobenen Ergebnissen.

### **Subjektiv:**

Zur subjektiven Auswertung nach beiden Studien wird die Methode der Beobachtung angewendet (Bortz & Döring, 2006; Roth et al., 1999). Im Falle der ersten Studie zur Bewertung der akustischen Signale, der Icons über das Display sowie der Interaktion mit dem Rückmeldungsinterface, wird eine Blickbewegungsbrille eingesetzt (Sarodnick & Brau, 2011). Diese zeichnet sowohl das Geschehen aus dem Blickwinkel des Probanden mit dem dazugehörigen Blickverlauf, als auch die akustischen Vorkommnisse auf. Die Aufzeichnung soll zur Unterstützung dienen, falls während der Auswertung der objektiven Ergebnisse Fragen auftauchen.

Während der zweiten Studie wird zur Dokumentation und für evtl. auftretende Unklarheiten eine Videoaufzeichnung vorgenommen.

Als wichtigste Methode zur Evaluation der Gestaltungslösungen wird ein Fragebogen entwickelt (Bortz & Döring, 2006; Roth et al., 1999; Sarodnick & Brau, 2011). Dieser gliedert sich in Fragen zur eigenen Person, Systemverständnisfragen, Fragen zu den einzelnen Signalen und Prototypen, Fragen zum Gesamtsystem und Fragen zur Studie selbst. In den einzelnen Bereichen werden dann Fragen zu den einzelnen Aspekten der Forschungsfragen gestellt. Zur Bewertung wird eine fünfstufige Likert Skala (Bortz & Döring, 2006) verwendet. Die Untergliederung erfolgt zwischen „trifft voll und ganz zu“ bis „trifft ganz und gar nicht zu“, wobei die Probanden darauf hingewiesen werden, dass die drei Bewertungsschritte dazwischen als äquidistant verteilt anzusehen sind. Darum wird bei diesen Feldern auf eine Beschriftung verzichtet. Bei Fragen, die der Proband kritisch dem System gegenüber beantwortet, steht zusätzlich ein Textfeld zur Verfügung. Dort sind weitere Ausführungen möglich. Außerdem werden Multiple-Choice-Fragen verwendet (Bortz & Döring, 2006), um auch nach Abschluss des aktiven Teils der Studie Verständnisfragen (z.B. Zuordnung richtiger Signalkombinationen) zum System stellen zu können. Dabei gilt es, die richtige/n Antwort/en anzukreuzen. Zum Einsatz kommt der Fragebogen in beiden Studien. In der ersten Studie entfallen lediglich die Fragen zur LED-Brille, da diese nicht getragen wird.

### **Objektiv:**

Zur objektiven Beurteilung der Studie werden unter anderem Log-Files eingesetzt. In diesen werden die Werte „Zeit vom Start der Gefahrenmeldung bis zum Antippen des Displays“, „Interaktionszeit während der Eingaben der Gesten“ und die Gesamtzeit ermittelt. Zusätzlich werden die Versuche beim Eingeben der Gesten zur Rückmeldung gespeichert. Ziel der Aufzeichnung von Log-Files ist es, Aussagen über den zeitlichen Verlauf eines Warnvorgangs treffen zu können.

Weiterhin soll mit Hilfe der Signalentdeckungstheorie (Bortz & Döring, 2006; Velden, 1982; Wickens, 2002) eine Auswertung der von den Probanden erfolgten Reaktionen auf die Gefahrenmeldungen erfolgen. Die Theorie unterscheidet hierbei zwischen vier verschiedenen Fällen (vgl. Tabelle 11).

**Tabelle 11 Die vier Fälle der Signalentdeckungstheorie in Anlehnung an Wickens (2002)**

	Signal vorhanden	Kein Signal vorhanden
Entdeckt	Treffer	Falscher Alarm
Nicht entdeckt	Verpasser	Korrekte Ablehnung

Um sicher zwischen den vier Fällen der Signalentdeckungstheorie unterscheiden zu können, wird zusätzlich zu der Rückmeldung über das Interface eine konkrete Handlung als Reaktion auf die Gefahrenmeldung gefordert. Dies geschieht in den beiden Studien auf unterschiedliche Weise. Während der Proband in der ersten Studie nur gebeten wird, dem Versuchsleiter verbal in einem kurzen Satz Rückmeldung zu seiner Handlungsauswahl zu geben, muss in der zweiten Studie eine konkrete Handlung durchgeführt werden. Abbildung 51 zeigt die beiden geforderten Handlungen in Folge der Gefahrenmeldungen. Im Falle einer Warnmeldung (Zug auf dem Nachbargleis) wird der Proband gebeten, deutlich einen Arm zu heben. Erfolgt eine Alarmierung (Zug auf dem Arbeitsgleis) soll sich der Proband in die Sichere Zone begeben und dort kurz verharren. Durch diese Form einer Handlungsrückmeldung kann der Versuchsleiter während des Versuchs die jeweilige Reaktion dokumentieren und einem der beiden Fälle „Treffer“ oder „Verpasser“ (Signal vorhanden) zuordnen. Kommt es vor, dass der Proband ein Signal entdeckt, obwohl das System inaktiv ist, würde der Versuchsleiter auch dies notieren und als „falschen Alarm“ bewerten. Der letzte Fall der Signalentdeckungstheorie (Signal nicht vorhanden; nicht entdeckt) liegt automatisch vor, wenn der Proband an der Arbeitsaufgabe arbeitet und das System inaktiv ist. Er wird nur über die Videoaufzeichnung dokumentiert. Die Videoaufzeichnung wird auch in unklaren Fällen zu Hilfe genommen, um eine Situation im Nachhinein bewerten zu können.



Abbildung 51 Handlungsreaktionen in Folge der Gefahrenmeldungen (links: Warnung; rechts: Alarmierung)

## 4.6 Versuchsablauf

In diesem Kapitel soll erklärt werden, wie der Ablauf der beiden Studien erfolgte. Dieser ähnelt sich zwar in beiden Fällen, soll aber trotzdem getrennt beschrieben werden, um die Übersichtlichkeit zu wahren.

**Erste Studie:**

Zu Beginn der Studie bekommen die Probanden einen Informationszettel, der Einzelheiten zum Einsatzgebiet individueller Warnsysteme enthält. Es wird der Hintergrund der beiden Gefahrensignale sowie die Ausprägung der Signale über die unterschiedlichen Signalgeber erläutert. Die individuelle Rückmeldung über die Eingabe von Gesten wird anhand von Bildern erläutert und die Bearbeitung der Arbeitsaufgabe erklärt. Die schriftliche Einweisung erfolgt, damit jeder Proband dieselben Informationen erhält. Somit können Effekte durch den Versuchsleiter ausgeschlossen werden. Anschließend bleibt dem Probanden etwas Zeit, um Rückfragen zu stellen.

Nun beginnt der eigentliche Versuch. Der Proband wird mit dem Blickbewegungssystem ausgestattet, worauf die Kalibrierung des Systems folgt. Durch ein kurzes (ca. 4 Minuten) Training kommt der Proband in Kontakt mit den Gefahrensignalen und hat ausreichend Zeit, die Rückmeldung zu erproben. Auch hier können Fragen direkt mit dem Versuchsleiter geklärt werden.

In den folgenden 40 Minuten Versuchsdauer werden in unregelmäßigen Zeitabständen 20 Gefahrenmeldungen (10 Alarme; 10 Warnungen) wiedergegeben und müssen korrekt bestätigt werden. Die Zeitabstände wechseln dabei nach einem randomisierten Schema zwischen einer Minute und drei Minuten in Abstufungen von einer halben Minute. In der Versuchszeit arbeitet der Proband selbstständig und ungestört an der Arbeitsaufgabe.

Nach Ablauf der Versuchszeit wird dem Probanden der Fragebogen ausgehändigt, den dieser dann ausfüllt. Der Versuch ist nach ca. 1 Stunde und 10 Minuten beendet. Es folgt eine kurze Verabschiedung, bei der dem Probanden für seine Zeit und Mühe gedankt wird.

**Zweite Studie:**

Der Ablauf der zweiten Studie verläuft in den meisten Bereichen analog zur ersten Studie. Auch hier bekommt der Proband eine Einweisung und wird auf das Warnsystem sowie auf die geforderten Handlungen in Folge der Gefahrenmeldungen geschult. Der Proband trägt diesmal das gesamte System bestehend aus LED-Brille, Bone Conduction-Interface und Display am Handgelenk.

Der Versuch selbst dauert länger als der erste Versuch. 60 Minuten dürfen sich die Probanden mit der Arbeitsaufgabe beschäftigen. Dies ist vor allem den längeren Zeiten zwischen den Gefahrenmeldungen geschuldet. Insgesamt werden wieder 20 Meldungen übermittelt. Folgende Aufteilung der Zeiten zwischen den Gefahrenmeldungen ergibt sich: 5 x 2 Minuten, 6 x

2,5 Minuten, 5 x 3 Minuten und 4 x 5 Minuten. Die Zeiten sind damit kürzer als auf existierenden Gleisbaustellen, wobei eine fünfminütige Pause zwischen zwei Gefahrenmeldungen dem Extremwert aus der Literatur entspricht (Walter, 2007). Eine realistische Einteilung der Zeiten hätte den Versuch auf eine unzumutbar lange Zeit verlängert.

Auch bei der Aufteilung der 20 Gefahrenmeldungen ergibt sich eine Änderung. Die dringlichere Alarmierung soll öfter abgebildet werden, um mehr Zeiten für die Auswertung zu generieren und um den Probanden die Möglichkeit zu geben, Alarmer in mehr Situationen zu erleben. Deshalb ergibt sich eine Aufteilung von 11 Alarmmeldungen zu 9 Warnmeldungen. Gefahrenmeldungen sowie die Pausen dazwischen werden in einer randomisierten Folge den Probanden dargeboten, wobei darauf geachtet wird, dass die fünfminütigen Pausen gleichmäßig über den gesamten Zeitraum verteilt sind.

Abschließend muss wieder der Fragebogen ausgefüllt werden, worauf die Verabschiedung erfolgt.

Damit schließt Kapitel 4 mit der abgeschlossenen Beschreibung des Versuchskonzeptes und es folgt Kapitel 5 mit den Ergebnissen zu den formulierten Forschungsfragen.

## 5 Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse

In Kapitel 5 sollen die Ergebnisse aus den beiden Studien präsentiert und diskutiert werden. Dabei wird immer wieder der Bezug zu den drei Forschungsfragen (vgl. Kapitel 3.2) hergestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit werden in jedem Unterkapitel die Ergebnisse zu einer Forschungsfrage vorgestellt und diskutiert. Die Ergebnisse beziehen sich auf die eingeschränkte Evaluation der umgesetzten Prototypen mit ihren Signalen. Eine allgemeine Evaluation aller Lösungen, die sich aus den Gestaltungshinweisen ergeben würden, ist innerhalb dieser Arbeit nicht möglich.

Die Vorstellung der Ergebnisse verläuft anhand von Balkendiagrammen mit Häufigkeitsverteilungen. Diese sind als prozentuale Verteilungen aufgeführt, um die Ergebnisse der beiden Studien mit unterschiedlicher Probandenanzahl vergleichbar zu gestalten. Die Prozentwerte sind dabei auf eine Stelle nach dem Komma gerundet. Auf der horizontalen Achse ist jeweils die fünfstufige Likert-Skala aufgetragen (Bortz & Döring, 2006). Es werden immer nur die beiden für das System sprechenden Aussagen mit positiven Werten kodiert. Die neutralen und negativen Aussagen gehen als negative Werte in die Auswertung ein. So sollen die Ergebnisse von einem sicheren Standpunkt aus diskutiert werden, bei dem neutrale Bewertungen ebenfalls einen Anlass zum kritischen Hinterfragen bzw. zur Verbesserung geben.

Die geschlechtsspezifischen Ergebnisse zwischen den Probanden wiesen keine Unterschiede auf. Aus diesem Grund beinhalten alle in Folge aufgeführten Ergebnisse die gemeinsamen Daten der männlichen und weiblichen Probanden.

Eine ähnliche Vorgehensweise wurde bei Einschränkungen (z.B. Hörschäden) gewählt. Die Ergebnisse zeigten keine Unterschiede, deshalb erfolgte keine besondere Betrachtung der Ergebnisse.

Im nun folgenden Kapitel wird die erste Forschungsfrage behandelt, die sich mit der Entdeckbarkeit und Erkennbarkeit der behandelten Signale beschäftigt.

### 5.1 Entdeckbarkeit und Erkennbarkeit der Signale

Im Rahmen der ersten Forschungsfrage sollten Gestaltungshinweise geprüft werden, die eine geeignete Entdeckbarkeit und Erkennbarkeit der Signale ermöglichen. Wie bereits am Anfang von Kapitel 5 erwähnt, kann innerhalb der Arbeit nur eine eingeschränkte Evaluation erfolgen. Um zu prüfen, ob die innerhalb dieser Arbeit genutzten Gestaltungsansätze zur Entdeckbarkeit und Erkennbarkeit beitragen, müssen die Signale bzw. die Signalkombinationen untersucht werden. Können diese gut entdeckt und erkannt werden, waren die Gestal-



tungsansätze unter den gegebenen Umgebungsbedingungen geeignet. Die Bearbeitung der Fragestellung geschieht in zwei Schritten. Zuerst wird die Entdeckbarkeit der Signale bzw. Signalkombinationen untersucht und anschließend die Erkennbarkeit behandelt.

Um der Fragestellung zur Entdeckbarkeit nachzugehen, wurde während beider Studien kontrolliert, ob alle Gefahrensignale entdeckt wurden. Zusätzlich sollte dokumentiert werden, ob die Probanden ein Gefahrensignal entdeckten, obwohl keines durch das System übermittelt wurde.

Das Ergebnis war sehr eindeutig. In beiden Studien wurde kein übermitteltes Signal durch die Probanden verpasst. Bei jeder Studie wurden pro Proband 20 Gefahrensignale übermittelt. Außerdem gab es keine Signale, die irrtümlich erkannt wurden.

Die Erkennbarkeit der Signale bzw. Signalkombinationen kann erst nach dem erfolgreichen Erkennen erfolgen. Es soll hinterfragt werden, ob die Signale nicht nur die Aufmerksamkeit der betreffenden Person erregen, sondern gleichzeitig noch eine spezifische Bedeutung übermitteln können. Dazu sollten die Probanden bewerten, wie gut sich die übermittelten Signale zur Warnung bzw. Alarmierung eignen. Als Signalgeber wurden hierbei die LED-Brille und das Bone Conduction-Interface hinterfragt.

Die Bewertung dieser Fragestellung verlief über vier Fragen aus dem Fragebogen, bei denen die Probanden angeben sollten, ob das jeweilige Signal (Alarm oder Warnung) deutlich erkennbar über den dazugehörigen Signalgeber übermittelt wurde. Dies sollten die Probanden in Bezug zu den vorliegenden Umgebungseinflüssen und der eigentlichen Darstellung des Signals bewerten. Positiv wurden nur die Bewertungen der Probanden ausgewertet, die Signale als deutlich erkennbar empfanden. Unschlüssige Antworten und solche, die Signale als nicht deutlich erkennbar bewerteten, zählten negativ.

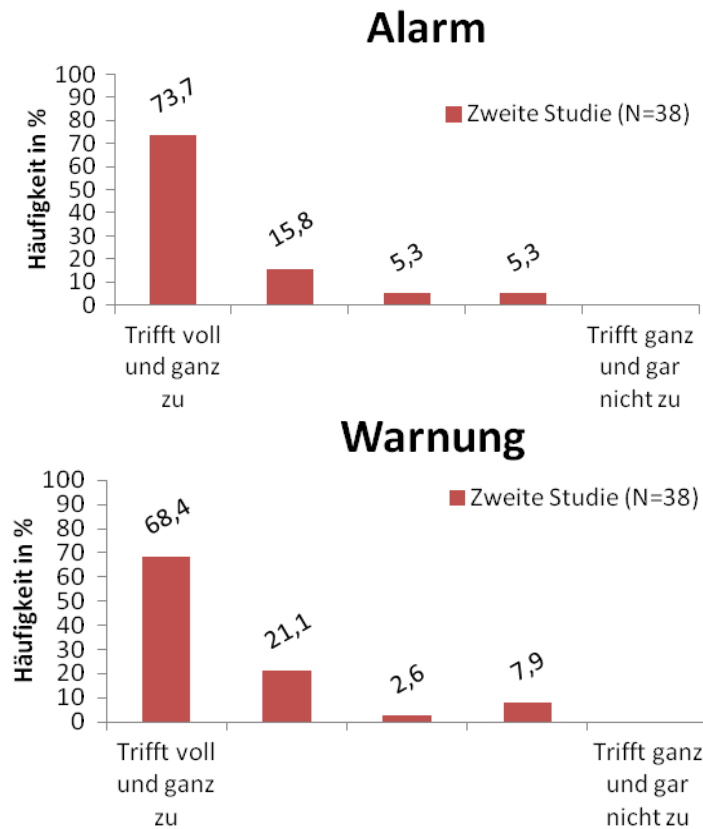


Abbildung 52 Wird das Signal „Alarm“ (oben) und „Warnung“ (unten) deutlich erkennbar über die LED-Brille dargestellt?

Abbildung 52 zeigt die Ergebnisse zu den visuellen Signalen über die LED-Brille aus der zweiten Studie. Alle Prozentwerte wurden auf eine Stelle nach dem Komma gerundet. Der überwiegende Teil der Probanden (89,5 Prozent) konnte das Signal „Alarm“ deutlich erkennen. Das Warnsignal wurde ebenfalls von 89,5 Prozent der Probanden deutlich erkannt. Allerdings schnitt das Signal in der Verteilung etwas schwächer ab als die Alarmierung.

Abbildung 53 gibt die Ergebnisse zu den akustischen Signalen wieder. Es liegen Werte zu beiden Studien vor, da das Bone Conduction-Interface über beide Studien hinweg getragen wurde. Für das Signal „Alarm“ gaben 90,3 Prozent der Probanden in der ersten Studie an, das Signal deutlich erkennen zu können. In der zweiten Studie schnitt das Signal mit 84,2 Prozent etwas schlechter ab.

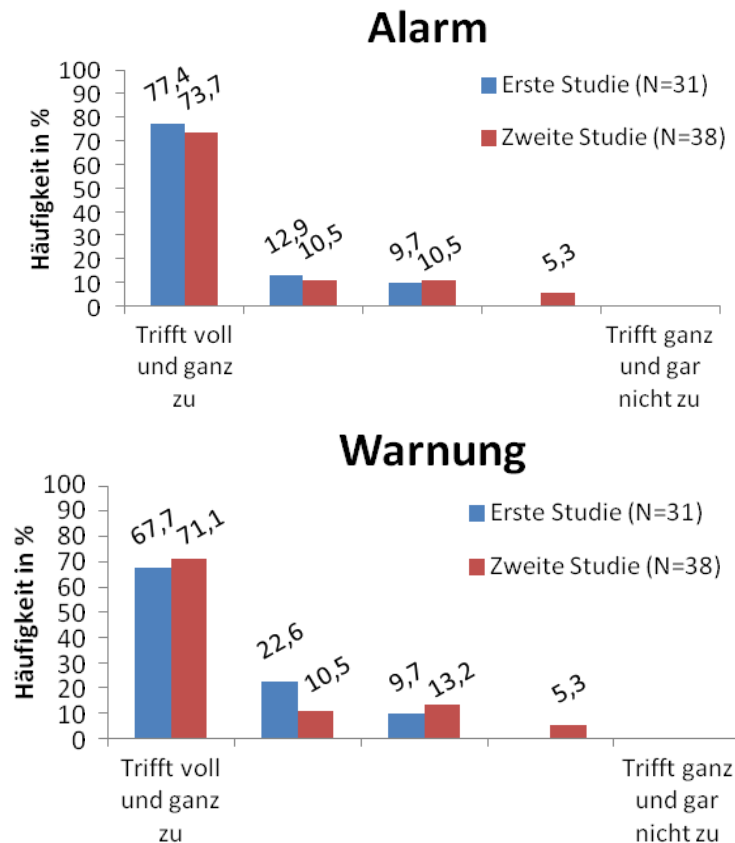


Abbildung 53 Wird das Signal „Alarm“ (oben) und „Warnung“ (unten) deutlich erkennbar über das Bone Conduction-Interface dargestellt?

Das Warnsignal wurde in der ersten Studie ebenfalls von 90,3 Prozent der Probanden als deutlich erkennbar empfunden. In der zweiten Studie waren es nur 81,6 Prozent der Probanden. Auch hier schneidet das Warnsignal auf Grund der Verteilung etwas schlechter ab als das Alarmierungssignal.

### 5.1.1 Diskussion

Dem Ergebnis nach zu urteilen, handelt es sich um Signale, die von den Probanden gut zu entdecken waren. Allerdings gilt dies nur für die hier untersuchten Situationen. In weiteren Schritten müsste geprüft werden, ob die Signale auch unter anderen Störeinflüssen sicher zu übermitteln sind. Interessant wäre die Untersuchung des Einflusses von natürlichen Lichteinflüssen. Dabei würde der hier erreichte Wert von 2300 Lux sicher überschritten werden und die LED-Brille würde durch die adaptive Regelung hellere Signale ausstrahlen. Es müsste geprüft werden, ob dann die Signale auch im hellen Sonnenlicht sicher wahrnehmbar sind.

Ähnlich wie die visuellen müssten auch die akustischen Signale über das Bone Conduction-Interface unter realen Bedingungen getestet werden. Unter anderem sollte das System in Kombination mit Kapselgehörschützern funktionieren.

Jeder Sinneskanal des Menschen wird in bestimmten Situationen überlastet, sodass es kein optimal sicheres Signal geben wird. Deshalb ist es wichtig, wie innerhalb dieser Arbeit beschrieben, immer multimodale Signale vorzusehen. Dadurch kann ein nicht entdecktes Signal durch ein redundantes Signal über einen anderen Sinneskanal ersetzt werden.

Bei der Erkennbarkeit der Signale bzw. Signalkombinationen zeigte sich, dass die meisten Probanden gut mit den Signalen zurechtkamen und die jeweilige Bedeutung deutlich erkennen konnten. Bereits die über die LED-Brille bzw. das Bone Conduction-Interface übermittelten Signale ermöglichten eine korrekte Erkennung.

Allerdings scheint es, als würde sich jeder Nutzer des Systems eine eigene Taktik zur Erkennung der Signale angewöhnen. Alle Probanden erhielten im Vorfeld schriftliche Informationen über die verschiedenen Signale und hatten anschließend Zeit, die Signale am System zu trainieren. Trotzdem kam von einigen Probanden aus den Versuchen z.B. die Rückmeldung, dass sie verwundert seien im Fragebogen zwei akustische Signale bewerten zu sollen. Es scheint als suchten sich die Probanden ein Signal zur Erkennung der Bedeutung heraus (z.B. die LED-Brille) und nutzten die anderen Signale nur zur Erweckung der Aufmerksamkeit (z.B. das Bone Conduction-Interface). So müssen nicht alle Signalgeber gleich intensiv beobachtet werden. Dies würde erklären, warum einige Probanden die Signale über bestimmte Signalgeber weniger gut bewerten konnten.

Durch weitere Versuche könnte evaluiert werden, ob die Signale weiter verbesserungswürdig sind oder die Probanden je nach Situation zur Erkennung der Signale bestimmte Signalgeber auswählen. Voraussetzung wären längere Versuche, in denen die Probanden das System in unterschiedlichen Situationen erleben können.

### **5.1.2 Fazit**

Die erarbeiteten Gestaltungslösungen eignen sich, unter den gegebenen Versuchsbedingungen eine gute Entdeckbarkeit zu erreichen. Alle Signale wurden durch die Probanden erkannt.

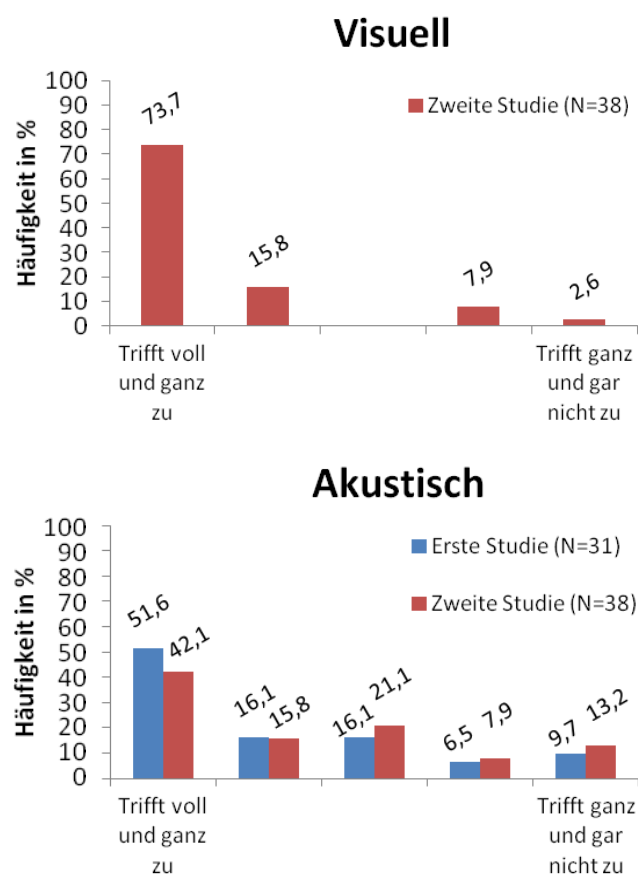
Die Signale Alarm und Warnung konnten immer eindeutig erkannt werden. Allerdings scheint die Taktik eines jeden Probanden darüber zu entscheiden, über welchen Signalgeber das Auftreten eines Signals erkannt wird. Deshalb müssten weitere Versuche die einzelnen Signalgeber noch einmal genauer analysieren, um zu zeigen, dass alle Gestaltungsansätze erfolgversprechend sind.

## 5.2 Unterscheidbarkeit der Signale

Nachdem die erste Forschungsfrage auf das Entdecken und Erkennen der Gestaltungsansätze eingegangen ist, setzt sich die zweite Forschungsfrage mit der Unterscheidbarkeit auseinander. Auch hier wurden die Probanden nur zu den umgesetzten multimodalen Warn- bzw. Alarmsignalen befragt.

Die Evaluation zur Unterscheidbarkeit der Signale wurde zu zwei Bereichen abgefragt. Zuerst sollten die beiden Signale von ihrer Bedeutung unterschieden werden und anschließend folgte die Unterscheidung der Signaldringlichkeit.

Die Ergebnisse zur allgemeinen Unterscheidbarkeit der Signale wurden über den Fragebogen erhoben. Primär wurden dabei die beiden Signalgeber LED-Brille und Bone Conduction-Interface betrachtet. Die Icons über das Display am Handgelenk sollten in erster Linie zur Rückversicherung in unklaren Situationen dienen. Abbildung 54 zeigt die Ergebnisse zur visuellen- bzw. akustischen Unterscheidbarkeit der Signale, wobei die visuellen Ergebnisse nur aus der zweiten Studie hervorgehen und die akustischen Ergebnisse für beide Studien vorliegen.



**Abbildung 54** Können die visuellen- (oben) bzw. akustischen Signale (unten) für die Zustände „Alarm“ und „Warnung“ problemlos unterschieden werden?

Die visuellen Signale über die LED-Brille konnten 89,5 Prozent der Probanden problemlos unterscheiden. Im akustischen Bereich sind die Probanden nicht mehr ganz so sicher, die Verteilung der Balken ist deutlich flacher. In der ersten Studie waren sich nur noch 67,7 Prozent der Probanden sicher, das Signal problemlos unterscheiden zu können, in der zweiten Studie waren es gerade noch 57,9 Prozent.

Außerdem erhielten die Probanden noch Fragen, bei denen sie zu einer beschriebenen Situation die zu erwartenden Signale bzw. Signalkombination angeben mussten.

Die erste Fragestellung befasste sich mit der korrekten Benennung des richtigen akustischen Signals sowie dem dazugehörigen Icon. Hier ordneten 27 Probanden von 31 in der ersten Studie die Signale richtig zu und in der zweiten Studie 36 von 38 Probanden.

In der zweiten Fragestellung waren die Signale Warnung bzw. Alarm auf Bildern mit der LED-Brille dargestellt und mussten zu einer passenden Situation zugeordnet werden. Für beide Signale schafften das in der zweiten Studie (hier wurde die LED-Brille getragen) alle der insgesamt 38 Probanden.

Nach der Beurteilung der generellen Unterscheidbarkeit der Signale soll die Dringlichkeit der Signale näher betrachtet werden. Dies geschieht über die Betrachtung der Icons und der akustischen Signale. Die Signale über die LED-Brille unterscheiden sich nur in ihrer Farbgebung und sollen daher hier nicht weiter betrachtet werden. Die während der Studien aufgenommenen Log-Files geben Auskunft darüber, wie lange die Probanden benötigten, um auf die beiden Gefahrenmeldungen zu reagieren. Dies sollte bei der dringlichen Alarmmeldung schneller gehen als bei der Warnmeldung.

Abbildung 55 zeigt die Bewertung der Icons zu beiden Studien. In der ersten Studie hielten 96,8 Prozent der 31 Probanden das Alarm-Icon für der Situation angemessen. In der zweiten Studie mit 38 Personen waren es 100 Prozent. Das Warn-Icon erzielte ähnliche Ergebnisse. Hier waren es in der ersten Studie 93,5 Prozent der Probanden und in der zweiten Studie ebenfalls 100 Prozent.

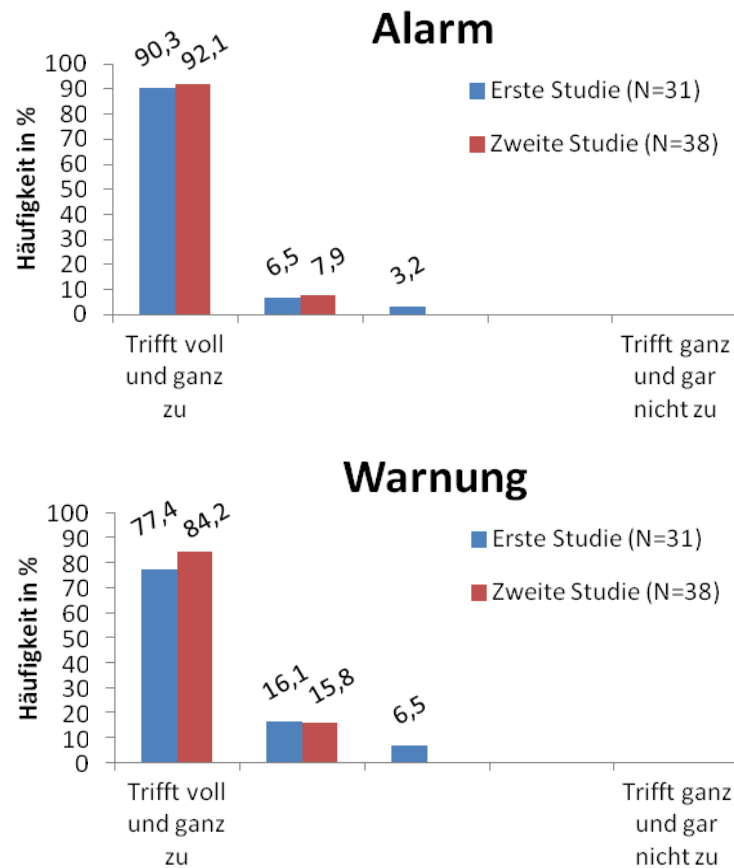


Abbildung 55 Das verwendete Icon ist zur Darstellung der Meldung „Alarm“ (oben) bzw. „Warnung“ (unten) angemessen.

Leider waren die Ergebnisse im akustischen Bereich nicht so eindeutig wie bei den Icons. Abbildung 56 zeigt die beiden Verteilungen für Alarmierung und Warnung zu Studie 1 und Studie 2. Das Alarmsignal wurde von 84,3 Prozent der Probanden (N=31) aus der ersten Studie als geeignet empfunden. In der zweiten Studie waren es 84,2 Prozent der Probanden (N=38). Das Warnsignal schnitt hier geringfügig schlechter ab. In der ersten Studie hielten 83,9 Prozent der Probanden das Signal für geeignet und in der zweiten Studie nur 76,3 Prozent der Probanden.

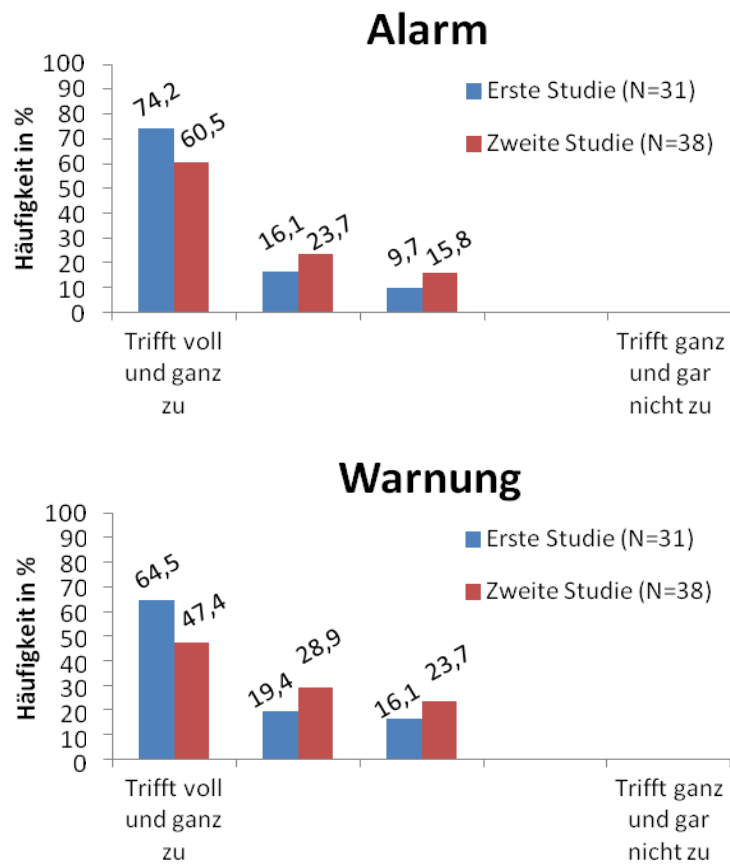


Abbildung 56 Das verwendete akustische Signal eignet sich für die Darstellung einer „Alarm“ Meldung (oben) bzw. „Warnung“ Meldung (unten).

Da primär über die akustischen Signale die Dringlichkeit ausgedrückt werden sollte, wurde dies im Fragenbogen durch eine Frage abgeprüft. Abbildung 57 zeigt die Einschätzung der Probanden aus beiden Studien, ob das akustische Alarmsignal dringlicher wirkt als das Warnsignal. Leider fiel das Ergebnis nicht ganz so positiv aus. In der ersten Studie sprachen sich 77,4 Prozent (N=31) für diesen Unterschied in der Wahrnehmung der Dringlichkeit aus und in der zweiten Studie 76,3 Prozent der Probanden (N=38).

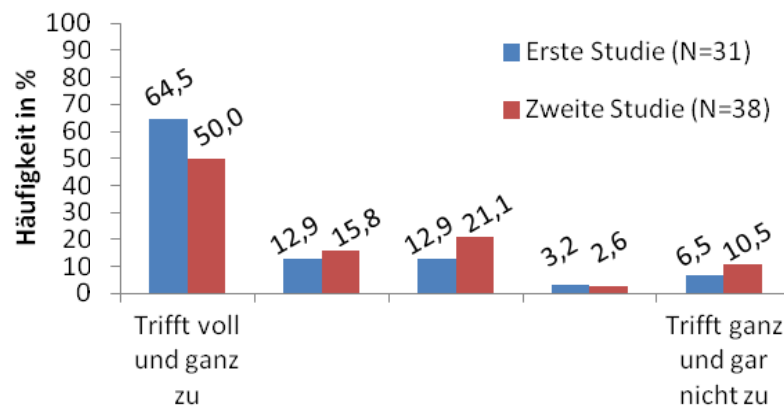


Abbildung 57 Das akustische Signal der Meldung „Alarm“ wirkt dringlicher als das der Meldung „Warnung“



Die Betrachtung der Ergebnisse aus den Log-Files soll über Tabelle 12 geschehen. Hierbei werden beide Studien betrachtet. Die Tabelle führt die Zeiten vor Beginn der Signalübertragung bis zur Aktivierung der Rückmeldungsinterfaces auf. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die erhaltenen Zeiten in Intervalle von je einer Sekunde unterteilt. Verglichen werden die Warnungen mit den Alarmierungen für beide Studien getrennt. Um die Vergleichbarkeit der Werte sicherzustellen, werden die Häufigkeitsverteilungen in Prozent angegeben. Im unteren Bereich von Tabelle 12 sind zusätzlich der Mittelwert und die Standardabweichung in Sekunden angegeben.

**Tabelle 12 Verteilung der Zeiten bis zur Aktivierung des Rückmeldungsinterfaces**

Zeit bis Aktivierung in Sekunden [s]	Erste Studie (N=31) Häufigkeitsverteilungen in Prozent		Zweite Studie (N=38) Häufigkeitsverteilungen in Prozent	
	<b>Warnung</b>	<b>Alarm</b>	<b>Warnung</b>	<b>Alarm</b>
kleiner 1 s	0,32	0,32	2,63	2,87
zwischen 1 und 2 s	53,55	65,48	28,36	36,12
zwischen 2 und 3 s	37,42	28,39	36,26	32,30
zwischen 3 und 4 s	6,13	5,16	19,01	15,79
zwischen 4 und 5 s	1,29	0,32	7,60	8,61
zwischen 5 und 6 s	0,32	0	2,92	2,87
zwischen 6 und 7 s	0,32	0,32	1,46	0,96
zwischen 7 und 8 s	0,65	0	0,29	0,24
zwischen 8 und 9 s	0	0	0,88	0,24
größer 9 s	0	0	0,58	0
Mittelwert in [s]	2,06	1,93	2,76	2,54
Standardabweichung in [s]	0,83	0,64	1,39	1,21

Die Mittelwerte fallen bei den Alarmierungen nur geringfügig kürzer aus als bei den Warnungen. Allerdings zeigen die Standardabweichungen, aber auch der Blick auf die Verteilung der Werte, dass die längeren Zeiten bis zur Aktivierung des Touchscreens die Mittelwerte stark beeinflussten. Dieser Effekt ist in der zweiten Studie noch ausgeprägter. Die meisten Probanden aktivierten den Touchscreen zwei bis drei Sekunden nach dem Start der Signale. Eine wirkliche Unterscheidung der Aktivierungsdauer zwischen den beiden Signalen ist allerdings nicht möglich.

### 5.2.1 Diskussion

Die Ergebnisse zur Unterscheidbarkeit sprechen ebenfalls für die Annahme, die bereits bei den Ergebnissen zum „Entdecken“ und „Erkennen“ diskutiert wurde. Scheinbar suchen sich

die Probanden einen bestimmten Signalgeber (LED-Brille, Bone Conduction-Interface oder Display am Handgelenk) heraus und bewerten die Signalbedeutung primär nach dieser Quelle. Zu den visuellen Signalen über die LED-Brille gibt es in Abbildung 54 keine unentschlossenen Meinungen. Vermutlich haben die 10,5 Prozent der 38 Probanden primär auf die akustischen Signale oder die Icons geachtet, um damit die Bedeutung zu unterscheiden. Als im Nachhinein die Signale den korrekten Situationen zugeordnet werden sollten (hier gab es keine anderen Signale als Anhaltspunkt), konnte dies von allen Probanden fehlerfrei durchgeführt werden. So kamen auch nur wenige Rückmeldungen oder Verbesserungsvorschläge. Für zukünftige Versuche sollten die gelben LEDs mehr hervorgehoben werden, um das Warnsignal besser erkennen zu können. Auch kam die Rückmeldung, dass die Signale wahrscheinlich im hellen Sonnenlicht schlechter zu erkennen und zu unterscheiden sein werden.

Bei den akustischen Signalen sind die Meinungen der Probanden sehr verteilt. So lässt sich jedem Signal scheinbar recht gut seine Bedeutung zuordnen (vgl. Kapitel 5.1), die Unterscheidung fiel aber nicht ganz so leicht. Auch hier ist es nicht unwahrscheinlich, dass jeder Proband sein präferiertes Signal besitzt und danach die Bedeutungen ableitet. So fällt den Probanden in der ersten Studie die Unterscheidung leichter als in der zweiten Studie. Auf Grund des Störgeräusches war es wahrscheinlich leichter, die Unterscheidung anhand der visuellen Signale durchzuführen, obwohl in Kapitel 5.1 die Erkennbarkeit keine großen Probleme darstellte. Außerdem gab es in der ersten Studie keine Signale über die LED-Brille, was die akustischen Signale zur Unterscheidung natürlich wahrscheinlicher werden lässt.

Verwunderlich ist das Ergebnis der zweiten Zuordnungsfrage, bei der die Probanden in einer beschriebenen Situation das richtige Icon und das richtige akustische Signal (akustisches Signal „Warnung“ bzw. „Alarm“) auswählen sollten. Hier wurden insgesamt sechs Fehler gemacht (1. Studie: 4 Fehler (N=31); 2. Studie: 2 Fehler (N=38)). Zwei Probleme konnten identifiziert werden. Das erste Problem bringen die Begriffe „Warnung“ und „Alarm“ mit sich. Sie liegen im Sprachgebrauch recht nahe zusammen, dadurch ist die Gefahr einer Verwechslung recht hoch. Die Probanden konnten die Bedeutung der Begriffe nicht immer klar voneinander trennen. Hier könnte noch einmal über die Wortwahl nachgedacht werden. Das andere Problem liegt in der Tatsache, dass die Probanden bis zu diesem Zeitpunkt die Signale nur über die Art der Rückmeldung über das Display unterscheiden mussten. Auch während der Handlung nach der Bestätigung gab es keine Verbindung zu den Worten „Alarm“ und „Warnung“. Das macht es schwer, nun plötzlich die richtige Antwort durch genau diese zwei Worte auszudrücken.

Bei der Untersuchung der Dringlichkeit muss zunächst festgehalten werden, dass in diesem Zusammenhang nur von der wahrgenommenen Dringlichkeit gesprochen werden kann. Da die Probanden noch nie eine reale Situation im Gleisbau erlebt haben und so auch keine Erfahrungen sammeln konnten, ist es unmöglich, von den Erfahrungen aus bereits erlebten Ereignissen zu profitieren. Die beiden Situationen Alarmierung (sehr dringlich, sofortige Handlung erforderlich) und Warnung (weniger dringlich, dient eher der Information) wurden den Probanden im Vorfeld mit Zuhilfenahme eines Beispiels beschrieben. So konnten die Signale auf Grund des im Vorfeld gewonnenen Eindrucks bewertet werden. Besonders die Icons, die eine Art Rückhalteebene darstellen, scheinen die Situationen deutlich darzustellen und tragen somit zu einer hohen wahrgenommenen Dringlichkeit bei.

Die akustischen Signale erzielten ihre Wirkung, könnten aber in der Dringlichkeit deutlicher unterscheidbar gestaltet werden. Hier besteht noch Verbesserungspotential. Eventuell sollte das Warnsignal etwas weniger dringlich gestaltet werden (z.B. durch eine andere Tonfolge oder eine sanftere Einleitung in das Signal), um so mehr Raum für die Unterscheidung der Dringlichkeit zu liefern. Auch wirkte sich der Effekt aus, dass die Probanden scheinbar ein Signal für die Unterscheidung (Alarmierung / Warnung) auswählten und die übrigen Signale weniger beachteten. Es kam die Rückmeldung, dass die beiden akustischen Signale überhaupt nicht unterschieden wurden und so Verwunderung darüber entstand, im Fragebogen zwei unterschiedliche Signale bewerten zu müssen.

Die Betrachtung der Log-Files zeigt keine großen Unterschiede zwischen den Signalen. Dies ist sowohl aus den Verteilungen als auch über die Mittelwerte zu erkennen. Hier gelang es scheinbar nicht, mit Hilfe des Alarmsignals eine erhöhte Dringlichkeit im Vergleich zur Warnung zu vermitteln. Der Einfluss der Icons kann dabei als sehr gering angesehen werden, da bei Betrachtung des Displays zügig das Antippen folgte. Es wird davon ausgegangen, dass sich bei der Warnung und der Alarmierung sehr ähnliche Zeiten ergeben. Die Standardabweichungen sind teilweise sehr hoch, dies kann durch die vereinzelt extrem langen Zeiten erklärt werden. Vermutlich beendeten die Probanden einen Arbeitsschritt bei der Bearbeitung der Arbeitsaufgabe und kümmerten sich dann erst um die Rückmeldung. Dies stellt ein Problem bei simulierten Gefahrensituationen dar, während denen verspätetes oder auch falsches Reagieren keine Konsequenzen hat.

Um es dem Nutzer besser zu ermöglichen, die Dringlichkeit über ein in der jeweiligen Situation passendes Signal wahrzunehmen, sollten auch die Signale über die LED-Brille in der Dringlichkeit unterscheidbar sein. Auch hier würde sich eine unterschiedliche Blinkfrequenz

der beiden Signale anbieten. Außerdem wäre es interessant, durch gezielten Einsatz von Stör-signalen die Probanden zu motivieren, in verschiedenen Situationen auf unterschiedliche Signalgeber zu achten. In diesem Zusammenhang könnte auch der Ausfall eines Signalgebers simuliert werden, um den Probanden zum Umdenken zu verleiten.

### 5.2.2 Fazit

Die Maßnahmen zur Unterscheidbarkeit der beiden Signale scheinen gegriffen zu haben. Es gab während der Versuche keinen Probanden, der ein Signal falsch deutete.

Eine klare Unterscheidbarkeit der Dringlichkeit der Signale ist durch die momentan verwendeten Signale nicht möglich. Hier besteht Verbesserungsbedarf, die akustischen Signale sind zu überarbeiten und eine zusätzliche Unterscheidbarkeit durch die visuellen Signale über die LED-Brille sollte ergänzt werden.

Auch in diesem Fall scheint die Taktik der Probanden darüber zu entscheiden, welchem Signalgeber sie ihre maximale Aufmerksamkeit zur Unterscheidung schenken. Für eine klarere Aussage zu diesem Sachverhalt muss das Versuchskonzept angepasst werden, um einzelne Signalgeber stärker in den Fokus zu rücken.

## 5.3 Rückmeldung zur Unterscheidung zwischen den beiden Signalen

Der letzte Punkt innerhalb der Evaluation der umgesetzten Gestaltungslösungen befasst sich mit dem Rückmeldungsinterface. Dieses sollte es dem Nutzer ermöglichen, eine Rückmeldung zu geben, die zwischen den beiden Signalen Alarm und Warnung unterscheidet.

Dazu wurde ein finaler Prototyp erarbeitet und bewertet. Es handelt sich dabei um eine grundsätzliche Betrachtung eines noch sehr prototypischen Konzepts. Hier müssen mittels Eingabemaske (Grid) Gesten auf einem Touchscreen am Handgelenk gezeichnet werden. Die Rückmeldung erfolgt durch jeweils eine spezielle Geste auf die beiden Meldungen „Alarm“ und „Warnung“.

Abbildung 58 zeigt die Einschätzung der Probanden zu der Aussage „Die Bedienung des Rückmeldesystems insgesamt ist einfach“. Hierbei werden beide Studien betrachtet. Das Ergebnis ist recht deutlich: In der ersten Studie hielten 96,7 Prozent der Probanden (N=31) das Rückmeldesystem für einfach bedienbar. In der zweiten Studie waren es sogar 97,4 Prozent der Probanden (N=38).

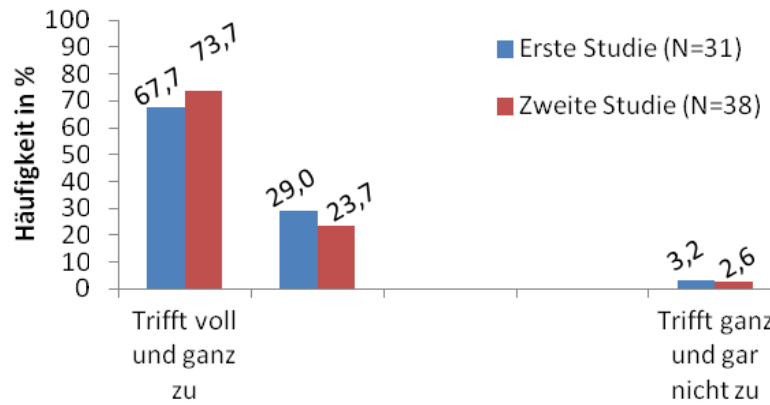


Abbildung 58 Die Bedienung des Rückmeldesystems insgesamt ist einfach

Weiter wurden die Probanden gefragt, ob während der Eingabe der Rückmeldung über das Grid Probleme auftraten. Abbildung 59 betrachtet ebenfalls beide Studien. Es zeigte sich, dass die Eingabe nicht ganz problemlos durchzuführen war. Hier hatten nur 67,8 Prozent der Probanden (N=31) in der ersten Studie keine Probleme, Gesten über das Grid einzugeben. In der zweiten Studie waren die Probleme noch ausgeprägter. Nur knapp über die Hälfte (57,9 Prozent) der Probanden (N=38) hatte keine Probleme bei der Eingabe.

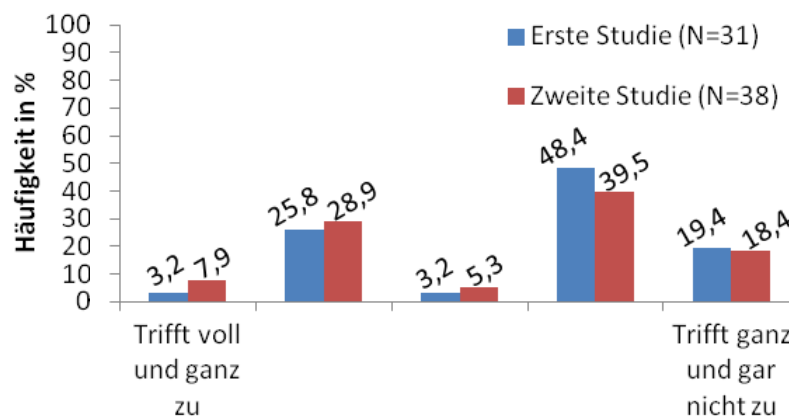


Abbildung 59 Bei Eingabe der Rückmeldung über das Grid sind Probleme aufgetreten

Um besser analysieren zu können, wo die Probleme bei der Eingabe auftraten, wurden die Probanden noch einmal gezielt nach den Eingabemustern für beide Signale gefragt. Abbildung 60 zeigt die Ergebnisse getrennt für die Meldungen „Alarm“ und „Warnung“ zu der Aussage: „Die Eingabe des Musters „Alarm“ bzw. „Warnung“ ist unproblematisch.“ Hierbei wurden beide Studien betrachtet. Bei der Bestätigung des Alarmsignals traten scheinbar Probleme auf. Hier sprachen sich nur 80,7 Prozent der Probanden (N=31) in der ersten Studie und 68,4 Prozent in der zweiten Studie (N=38) für eine unproblematische Bestätigung aus. Die Bestätigung des Warnsignals schnitt bei der Bewertung als unproblematischer ab. Hier sprachen sich in der ersten Studie 93,6 Prozent der Probanden (N=31) und in der zweiten Studie 84,2 Prozent (N=38) für eine unproblematische Bestätigung aus.

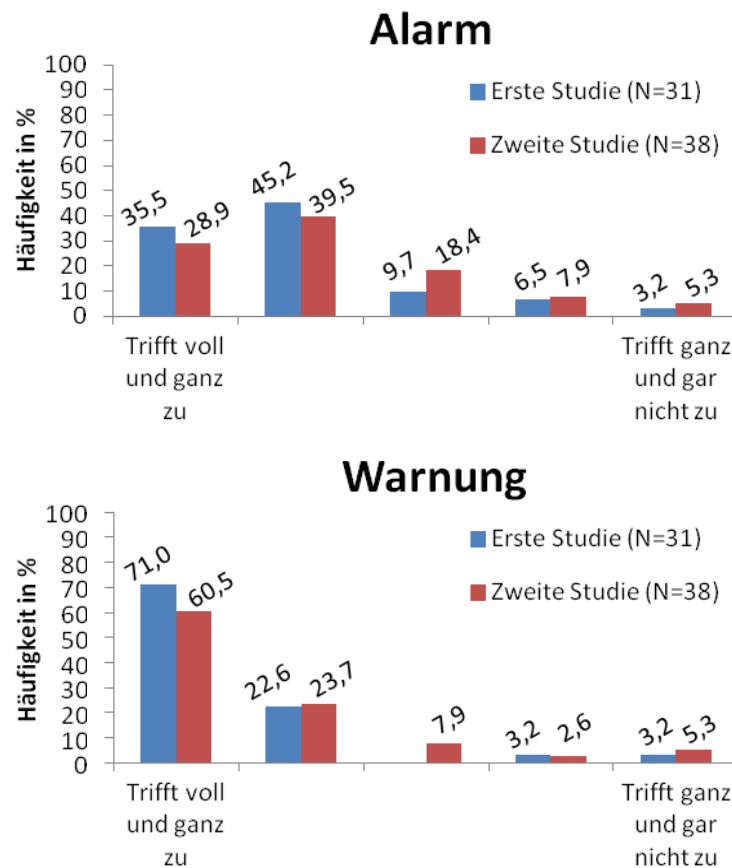


Abbildung 60 Die Eingabe des Musters „Alarm“ (oben) bzw. „Warnung“ (unten) ist unproblematisch.

Um Probleme bei der Bestätigung der beiden Signale zusätzlich unter objektiven Gesichtspunkten zu betrachten, wurde an dieser Stelle eine Analyse der Log-Files hinzugezogen. Hier sollte die durchschnittliche Anzahl der Anläufe bei der Eingabe der jeweiligen Geste, sowie die jeweils benötigten Zeiten für die Interaktion betrachtet werden.

Die Betrachtung der Ergebnisse aus den Log-Files erfolgt über die Tabellen 13 und 14, ebenfalls zu beiden Studien. Um die Vergleichbarkeit der Werte sicherzustellen, werden die Häufigkeitsverteilungen in Prozent angegeben.

Tabelle 13 zeigt die prozentuale Verteilung der Anzahl der Anläufe bis zur erfolgreichen Beendigung der Rückmeldung. Zur besseren Übersichtlichkeit werden die enthaltenen Anläufe in Intervalle von jeweils einem Anlauf unterteilt, wobei die Ergebnisse größer neun das anschließende Intervall bilden. Mittelwert und Standardabweichung sind wieder in der Anzahl an Anläufen angegeben.

Tabelle 13 Verteilung der Anzahl der Anläufe bis zur erfolgreichen Beendigung der Rückmeldung

Anzahl der Anläufe	Erste Studie (N=31) Häufigkeitsverteilungen in Prozent		Zweite Studie (N=38) Häufigkeitsverteilungen in Prozent	
	Warnung	Alarm	Warnung	Alarm
1	79,03	85,81	71,05	71,77
2	15,48	7,42	18,71	17,22
3	3,23	4,52	7,02	7,18
4	1,29	1,94	1,75	2,15
5	0,32	0,32	0,58	0,24
6	0,32	0	0,58	1,20
7	0	0	0,29	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
größer 9	0,32	0	0	0,24
Mittelwert in Anläufen	1,34	1,24	1,454	1,47
Standardabweichung in Anläufen	1,16	0,65	0,88	0,98

Die Tabelle zeigt, dass der Großteil der Probanden zwischen einem und zwei Versuchen bis zur richtigen Bestätigung der Meldung benötigten. Auch in dieser Verteilung ist keine eindeutige Unterscheidung zwischen den beiden Gefahrenmeldungen möglich. Die Standardabweichungen werden durch die Durchläufe mit vielen Versuchen stark beeinflusst.

Tabelle 14 zeigt die prozentuale Verteilung der Interaktionszeiten bis zur erfolgreichen Beendigung der Rückmeldung. Hier sind die Schritte in Sekunden eingeteilt und alle Werte größer neun sind im letzten Schritt zusammengefasst. Mittelwert und Standardabweichung sind in Sekunden angegeben.

Tabelle 14 Verteilung der Interaktionszeiten bis zur erfolgreichen Beendigung der Rückmeldung

Interaktionszeiten in [s]	Erste Studie (N=31) Häufigkeitsverteilungen in Prozent		Zweite Studie (N=38) Häufigkeitsverteilungen in Prozent	
	Warnung	Alarm	Warnung	Alarm
kleiner 1 s	0,97	1,94	0	2,63
zwischen 1 und 2 s	31,29	51,29	28,65	50,24
zwischen 2 und 3 s	40,97	34,52	38,30	26,79
zwischen 3 und 4 s	14,84	6,45	15,20	12,44
zwischen 4 und 5 s	6,45	3,23	7,02	3,59
zwischen 5 und 6 s	1,61	1,61	4,68	2,39
zwischen 6 und 7 s	1,94	0,65	0,88	0,96
zwischen 7 und 8 s	0,32	0,32	2,05	0,48
zwischen 8 und 9 s	0,97	0	1,17	0,24
größer 9 s	0,65	0	2,05	0,24
Mittelwert in [s]	2,74	2,13	3,04	2,33
Standardabweichung in [s]	1,52	1,00	1,79	1,30

Die meisten Probanden interagierten zwischen einer und vier Sekunden mit dem Touchscreen. Auch hier sind die Gefahrenmeldungen durch die Durchläufe mit extrem langen Zeiten nicht eindeutig unterscheidbar. Dies macht sich auch in den Standardabweichungen bemerkbar.

Als zusätzlicher Punkt sollte noch der Einfluss der Beleuchtung in beiden Studien betrachtet werden. Es stellt sich die Frage, ob die Helligkeit der Umgebung bei der Eingabe der Rückmeldung auf dem Display stört. Abbildung 61 zeigt hierzu die Verteilung der Ergebnisse. In der ersten Studie sprachen sich 95,8 Prozent der Probanden (N=31) und in der zweiten Studie 97,3 Prozent (N=38) gegen eine Störung aus.

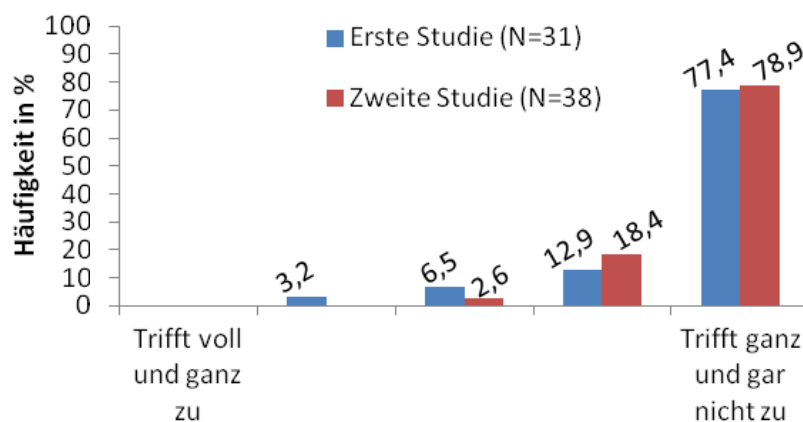


Abbildung 61 Die Helligkeit der Umgebung hat bei Eingabe der Rückmeldung am Display gestört



### 5.3.1 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die Rückmeldung anhand von Gesten und durch Nutzung der geometrischen Kodierung der Icons, bei den Probanden als sehr einfach bewertet wurde und wenig Zeit kostet. Probleme ergaben sich allerdings bei der Interpretation der eingegebenen Gesten durch die Software. Je nachdem wie die Probanden ihre Eingaben tätigten, kamen manche besser und manche schlechter mit dem System zurecht. Dies zeigt auch Abbildung 59, die Meinungen sind zweigeteilt. Es gibt kaum neutrale Bewertungen, dafür aber eine positiv und eine negativ eingestellte Gruppe. Gründe dafür sollen im weiteren Verlauf erörtert werden.

Die getrennte Betrachtung der Ergebnisse zu Eingabeproblemen bei den Gesten für „Warnung“ und „Alarm“ zeigen ebenfalls keine eindeutigen Erkenntnisse. Aus den Daten der Fragebögen geht hervor, dass die Probanden bei der Eingabe der Geste für den Alarm mehr Probleme hatten, als bei der Eingabe der Warnung. Die Betrachtung der objektiven Ergebnisse aus den Log-Files zeigt, dass die Rückmeldung einer Warnmeldung durchschnittlich länger dauerte und durchschnittlich mehr Anläufe bis zur richtigen Eingabe benötigte. Dies geht auch aus den prozentualen Verteilungen hervor (vgl. Tabelle 13 und Tabelle 14). Die teilweise recht großen Standardabweichungen lassen sich durch Ausreißer in den Ergebnissen erklären. Hier benötigte z.B. ein Proband 18 Versuche bis zur richtigen Bestätigung der Geste. In einem solchen Fall könnte, wie öfters angemerkt, das Softwaresystem einen Fehler aufgewiesen haben. Bei der Alarmierung zeigte sich aus den Kommentaren der Fragebögen, dass die Geste in Zusammenhang mit dem Grid Probleme verursachte. Die diagonalen Bereiche in der Ausführung der Geste bedingten, dass die Probanden zwischen zwei Punkten des Grids hindurch fahren mussten. Dies gelang Probanden mit dickeren Fingern (die Probanden bezeichneten ihre Fingergröße subjektiv als groß) weniger gut und es kam zur versehentlichen Aktivierung von falschen Punkten des Grids. Diese Tatsache erklärt auch warum eine Gruppe keine Probleme hatte, die andere aber massive Probleme.

Bei der Warnung kommt die Tatsache zum Tragen, dass die „Warngeste“ von der Weglänge auf dem Display mit vier Linien länger ausgeführt war, als die Geste der Alarmierung. Dadurch könnte die längere Zeit bei der Ausführung erklärt werden, nicht aber die größere Anzahl an Anläufen bis zur richtigen Eingabe. Hier geben die Kommentare Auskunft über die möglichen Hintergründe. Oft wurde von dem Probanden bemängelt, dass zwar die Punkte in den Ecken gut auszuwählen waren, nicht aber jene in der Mitte der Linie. Beim schnellen Überfahren des mittleren Punktes wurde dieser teilweise nicht vom System registriert. Leider war zu diesem Zeitpunkt für die Probanden nicht klar, worin der Eingabefehler bestand, da

das Viereck komplett abgefahren wurde (sogar die Linie, die den Eingaben folgt, zeigte das Viereck). So kam es zu vielen Wiederholungen, ohne dass die Eingabe richtig gewertet wurde. An diesem Punkt kam es vermehrt zu Nachfragen beim Versuchsleiter, da das Vertrauen in das System verloren ging (als Reaktion erfolgte die erneute Erklärung des korrekten Vorgehens). Dieser Sachverhalt bewegte die Probanden hin zu einer eher langsameren Eingabe der Geste, um kontrollieren zu können, ob die mittleren Punkte auch wirklich aktiviert wurden. Dadurch wiederum kam es zu den längeren Eingabezeiten.

Die Diskussion des Rückmeldekonzepthes zeigt, dass hier noch Verbesserungspotential vorliegt. Kurzfristig könnte durch eine Streckung des Grids über die gesamte Displaybreite der Abstand zwischen den Punkten vergrößert und dadurch die Einflüsse der Fingerdicke reduziert werden. Langfristig stellt sich die Frage, ob es nicht sinnvoller wäre, eine Freihandgeste zu verwenden. Dadurch wäre der Aufwand der rechnergestützten Interpretation der Gesten zwar größer, es müsste aber nicht mehr darauf geachtet werden, die Punkte des Grids sicher zu treffen. Außerdem wäre dadurch auch eine „blinde“ Eingabe der Gesten möglich, was die Zeiten während des gesamten Ablaufes weiter reduzieren würde.

Glücklicherweise hatte die Helligkeit der Umgebung nur einen geringen Einfluss auf die Eingaben während der Rückmeldung. Dieser Sachverhalt sollte aber nicht überbewertet werden, da erst künftige Studien unter freiem Himmel zeigen werden, wie geeignet dieses Eingabeverfahren in Bezug auf das Umgebungslicht ist.

### **5.3.2 Fazit**

Das Konzept der Bestätigung durch die geometrisch codierten Gesten scheint gut geeignet zu sein. Eine individuelle Rückmeldung und damit die Unterscheidung der beiden Signale Alarm und Warnung war unter den hier vorliegenden Versuchsbedingungen möglich. Die Umsetzung ist allerdings noch stark verbesserungsfähig. Dies betrifft sowohl die Gestaltung des Grids als auch die softwaretechnische Umsetzung der Rückmeldefunktion.

## 6 Methodische Diskussion

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen innerhalb der Arbeit diskutiert. In Kapitel 6.1 steht die Vorgehensweise während der Entwicklung der Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen im Mittelpunkt. Hier sollen in erster Linie die Erfahrungen mit dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 diskutiert werden.

In Kapitel 6.2 und 6.3 wird das Versuchskonzept diskutiert. Kapitel 6.2 handelt von der Eignung des Versuchskonzeptes zur Prüfung der entwickelten Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen. Kapitel 6.3 befasst sich mit der Vorgehensweise während der Entwicklung des Versuchskonzeptes und möglichen Verbesserungsvorschlägen.

### 6.1 Vorgehen während der Entwicklung der Konzepte

In diesem Kapitel soll das iterative Vorgehen während der Entwicklung der Prototypen diskutiert werden. Der menschenzentrierte Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210 gibt grundsätzlich die Schritte bei der Entwicklung bereits vor. Allerdings wurde jeder Prototyp mit den dazugehörigen Signalen in einem eigenen abgegrenzten Iterationsprozess entwickelt. Das heißt die Zusammenführung der Prototypen zu einem Gesamtsystem geschah nur an wenigen ausgewählten Meilensteinen. Dieses Vorgehen wirkte sich positiv auf die Entwicklungsgeschwindigkeit aus, da es nicht notwendig war, auf die Fertigstellung der übrigen Prototypen zu warten. Während die Iterationsschleifen anfangs noch über alle Phasen des menschenzentrierten Gestaltungsprozesses gingen, wurde später z.B. die Phase der Anforderungserarbeitung übersprungen, da hier nichts mehr zu ergänzen war. Dies verkürzte die Iterationsschleifen und ließ mehr Raum, die Schwachstellen der vorherigen Iteration zu bearbeiten.

Was sich für die Entwicklung der einzelnen Komponenten als sehr positiv herausstellte, behinderte ein Stück weit die Zusammenführung zu einem Gesamtsystem. Hier wären mehr Meilensteine sinnvoll gewesen, um das System zwingend zusammenzuführen. Denn gerade das Zusammenspiel der einzelnen Prototypen warf kurz vor der finalen Studie noch einige Probleme auf. Hier war es die Software zur Steuerung der einzelnen Prototypen, die nicht ausreichend getestet werden konnte, um die Versuche fehlerfrei durchführen zu können.

Ein weiterer Punkt betrifft die Entwicklung des Rückmeldungskonzeptes. Auch dabei wurde nach dem menschenzentrierten Gestaltungsprozess gearbeitet. Allerdings stiegen hier die Anforderungen an das System sehr stark an. Während im ersten Konzept durch die physikalischen Taster die Interaktion mit dem System noch einfach gehalten war, verlief das dritte Konzept bereits durch einen Dialog über das Display des Touchscreen. Geschuldet war dies in

erster Linie einer intuitiveren Durchführung einer Rückmeldung. Gleichzeitig boten die Weiterentwicklungen mehr Sicherheit gegenüber einer unbeabsichtigten Bestätigung einer Meldung. In diesem Zusammenhang wurden methodisch die Grundsätze der Dialoggestaltung nach DIN EN ISO 9241-110 eingesetzt. Dieser Schritt erwies sich im Nachhinein als sehr sinnvoll. Die verschiedenen Grundsätze konnten während der Entwicklung des graphischen Nutzerinterfaces miteinbezogen werden. Am Ende jeder Iterationsstufe konnte so geprüft werden, ob die jeweiligen Grundsätze erfüllt wurden. Nicht jeder Grundsatz wurde mit gleich hoher Priorität betrachtet. Die Individualisierbarkeit z.B. stand im Konflikt mit der Tatsache, dass in der Praxis das System von den unterschiedlichsten Personen getragen werden muss. Deshalb sollte das Ziel eine einheitliche Lösung für den gesamten Nutzerkreis sein.

Nach dieser Betrachtung des Vorgehens während der Entwicklung der Konzepte, soll nun das Vorgehen bei der Auslegung des Versuchskonzeptes betrachtet werden.

## 6.2 Eignung des Versuchskonzeptes

In diesem Kapitel sollen zuerst die Ergebnisse zur Eignung des Versuchskonzeptes vorgestellt und anschließend diskutiert werden.

### 6.2.1 Ergebnisse aus den beiden Studien

Dieses Kapitel soll die Ergebnisse zur Eignung des Versuchskonzeptes für die hier vorliegende Laborstudie liefern.

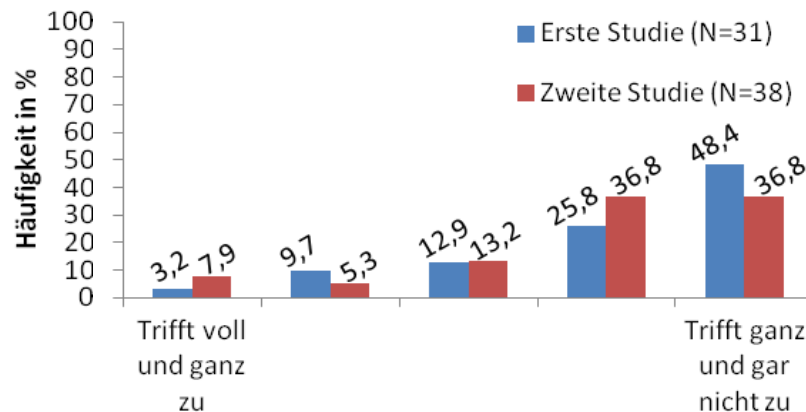
Ein wichtiger Punkt dabei ist die Umsetzung der Arbeitsaufgabe, da diese die Probanden von den eigentlichen Warnmeldungen ablenken soll. Auch die zeitliche Abfolge der Signale ist in diesem Zusammenhang wichtig und wird in den Ergebnissen analysiert.

Andere Einflüsse wie beispielsweise Beleuchtung oder Störschall sollen hier nicht betrachtet werden, da diese von Studie zu Studie speziell auf die jeweiligen Fragestellungen angepasst werden müssen und daher keine wirkliche Aussage über die Eignung des Versuchskonzeptes liefern.

In den folgenden Abschnitten werden sowohl die Ergebnisse der ersten Studie für den Zusammenbau eines LEGO-Bausatzes als auch die Ergebnisse der zweiten Studie für die Errichtung der Holzhütte betrachtet.

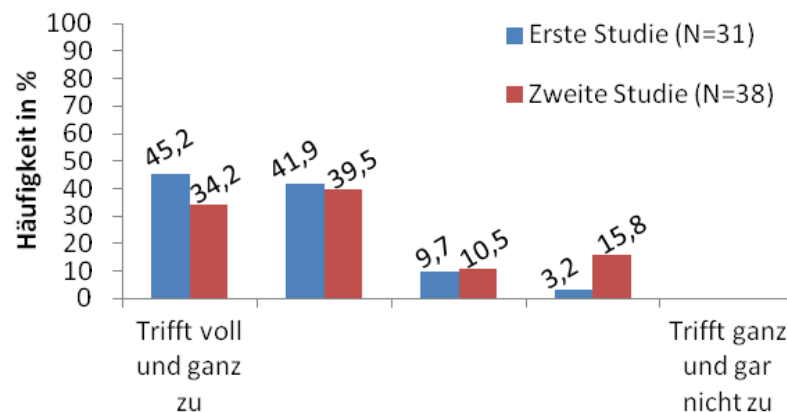
Abbildung 62 zeigt die Ergebnisse zu der Aussage „Ich habe während der Bearbeitung der Arbeitsaufgabe bereits auf das nächste Signal gewartet.“. Hier antworteten 74,2 Prozent der Probanden in der ersten Studie (N=31), dass sie bei der Bearbeitung der LEGO-Aufgabe nicht

auf ein kommendes Signal gewartet haben. Bei der zweiten Studie waren es 73,6 Prozent der Probanden (N=38), die nicht ständig auf ein Signal warteten.



**Abbildung 62 Während der Bearbeitung der Arbeitsaufgabe wurde bereits auf das nächste Signal gewartet**

Daraufhin wurden die Probanden gefragt, ob die Bearbeitung der Arbeitsaufgabe die volle Aufmerksamkeit forderte. Hierzu zeigt Abbildung 63 die Ergebnisse zu den beiden Aufgaben. 87,1 Prozent der Probanden (N=31) gaben an, die LEGO-Aufgabe würde ihre volle Aufmerksamkeit fordern. Bei dem Aufbau der Hütte waren es nur 73,7 Prozent der Probanden (N=31).



**Abbildung 63 Die Arbeitsaufgabe forderte zur Bearbeitung die volle Aufmerksamkeit der Probanden**

Um sicherzustellen, dass es durch die beiden Aufgaben zu keiner Überforderung der Probanden kommt, wurde auch dies durch eine Frage im Fragebogen geprüft. Abbildung 64 zeigt die Ergebnisse zu den beiden Studien. Die LEGO-Aufgabe wurde von 93,5 Prozent der Probanden (N=31) als nicht überfordernd bewertet. Bei der Aufgabe mit der Holzhütte waren es 92,1 Prozent der Probanden (N=38).

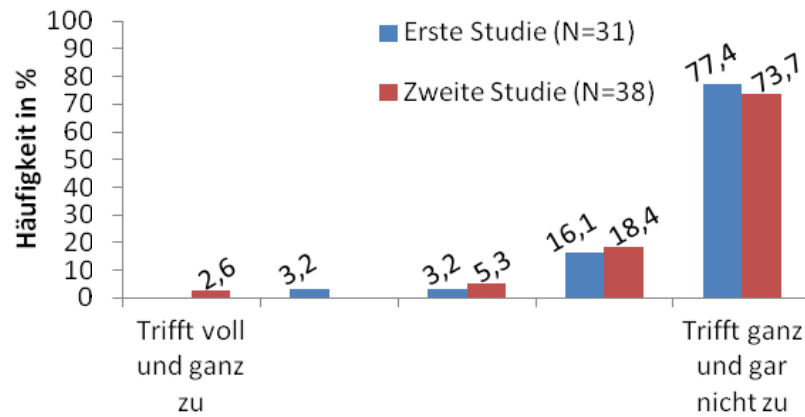


Abbildung 64 Stellte die Arbeitsaufgabe stellte eine Überforderung dar?

Abschließend wurden die Probanden über die zeitliche Abfolge der beiden Gefahrenmeldungen befragt. Hier sollte ermittelt werden, ob die Signale zu dicht aufeinander folgten. Abbildung 65 zeigt die Ergebnisse zu den beiden Studien. 80,6 Prozent der Probanden empfanden die Abfolge der Gefahrenmeldungen in der ersten Studie (N=31) als nicht zu kurz gewählt. In der zweiten Studie beschrieben 89,5 Prozent der Probanden (N=38) die Abstände als nicht zu kurz.

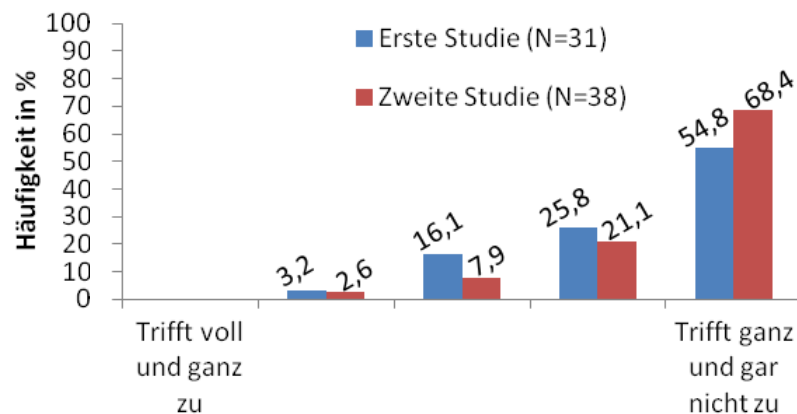


Abbildung 65 Die Abstände zwischen den Signalen waren zu kurz

Die hier vorgestellten Ergebnisse sollen nun noch einmal kritisch diskutiert werden.

## 6.2.2 Diskussion

Die Ergebnisse zur Eignung des Versuchskonzeptes fallen sehr positiv aus. Die Probanden bewerteten sowohl die LEGO-Aufgabe als auch den Zusammenbau der Holzhütte zur Ablenkung von den Gefahrenmeldungen als geeignet. Bei der Frage, ob während der Arbeit bereits auf das nächste Signal gewartet wurde, waren in beiden Studien ca. 74 Prozent der Probanden zufrieden mit der Aufgabe (vgl. Abbildung 62). Aus den Kommentaren lässt sich schließen, dass wegen des Ablaufs der Studie jederzeit ein Signal auftauchen könnte und deshalb dieses natürlich erwartet wurde. Aber dies sei ähnlich der Situation auf den Gleisen, in der auch je-

derzeit ein Zug anfahren könnte. Viele Probanden hatten anfangs Schwierigkeiten, sich an diese neue Situation zu gewöhnen und vor allem Angst, Fehler zu machen. Mit der Zeit kam vermutlich die Routine und damit übertrug sich immer mehr Aufmerksamkeit auf die Arbeitsaufgaben. Diese Vermutung könnte auch der Grund sein, dass die Verteilung in Abbildung 63 keine absolute Zustimmung ergibt. Die Verteilung zeigt zwar, dass die Arbeitsaufgabe von einem Großteil der Probanden die volle Aufmerksamkeit forderte, doch speziell in der zweiten Studie sind sich einige nicht ganz sicher. Viele Probanden, die die Aufgabe hier negativ bewerteten, äußerten, dass sie sich anfangs an die Situation gewöhnen mussten.

Die Mehrheit der Probanden fühlte sich von der Arbeitsaufgabe nicht überfordert (vgl. Abbildung 64). Sowohl bei der LEGO-Aufgabe als auch bei dem Aufbau der Holzhütte gab es Probanden die äußerten, nicht begabt in baulichen Tätigkeiten zu sein. In diesen Fällen kam es sehr wohl zu einer Überforderung der betreffenden Personen. Da diese Aufgabe aber speziell für bauliche Tätigkeiten gewählt war, stellen solche Kommentare keinen Hinderungsgrund dar.

Generell wird die LEGO-Aufgabe etwas besser bewertet als der Bau der Holzhütte, was mit der Probandengruppe zu tun haben könnte. In Gesprächen nach den Versuchen äußerten viele der jungen männlichen Probanden, dass sie darin eine Herausforderung sahen, die zusätzlich motivierend wirkte. Um diesen Effekt auch bei der Holzhütte zu erzeugen, könnten zusätzliche Details ergänzt werden, die den Zusammenbau abwechslungsreicher gestalten. Grundsätzlich muss die Arbeitsaufgabe aber zum Arbeitskontext passen. Die beiden hier verwendeten Aufgaben decken dabei bauliche Tätigkeiten im Sitzen und Stehen recht gut ab. Es ist aber auch vorstellbar, die LEGO-Aufgabe bei anderen sitzenden Kontexten zu nutzen. Wichtig ist nur, dass die Probandengruppe für diese Art von Tätigkeit geeignet ist.

Die Ergebnisse zur zeitlichen Verteilung der Signale fallen in der zweiten Studie etwas besser aus (vgl. Abbildung 65). Das könnte an der Tatsache liegen, dass in der zweiten Studie etwas längere Abstände zwischen den Signalen gelassen wurden. Dadurch verlängerte sich die Versuchsdauer auf ca. eine Stunde und die Probanden hatten mehr Zeit, sich mit dem Informations- bzw. Warnsystem zu beschäftigen. Für zukünftige Versuche sollten die längeren Pausen zwischen den Signalen beibehalten werden.

Für die durchgeführten Laborversuche erwies sich das Versuchskonzept als geeignet. Es wurde an einigen Stellen Verbesserungspotential aufgedeckt, um zukünftige Versuche zu optimieren. Generell sollten die Prototypen und Signale allerdings in Feldstudien oder Studien im

kontrollierten Feld weitergetestet werden. Ob dort das Versuchskonzept in angepasster Form verwendbar ist, muss erst geprüft werden.

### 6.3 Vorgehen bei der Entwicklung und mögliche Verbesserungen des Versuchskonzeptes

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen bei der Entwicklung des Versuchskonzeptes diskutiert und Möglichkeiten der Verbesserung aufgedeckt. Dabei sollen auch die gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 6.2 (Eignung des Versuchskonzeptes) mit einfließen.

Das Vorgehen bei der Entwicklung des Versuchskonzeptes erfolgte ebenfalls iterativ und parallel zur Entwicklung der Prototypen, wobei der während den Versuchen verwendete Fragebogen zusätzlich auch Fragen zum Versuchskonzept enthielt. Hauptsächlich wurde an geeigneten Arbeitsaufgaben, Umgebungsbedingungen und dem Fragebogen gearbeitet. Die Arbeitsaufgaben orientierten sich in der Anfangsphase immer an einem speziellen Prototyp mit seinen Signalen. Erst in den späteren Iterationen wurden die erprobten Arbeitsaufgaben am Gesamtsystem getestet. Verschiedene Umgebungsbedingungen wurden ebenfalls ausprobiert und im Verlaufe der Iterationen an die Laborstudie angepasst. Geeignete Fragen flossen nach und nach in den Gesamtfragebogen für die abschließenden Versuche ein.

Die Vorgehensweise bei der Entwicklung des Versuchskonzeptes verlief durch die Iterationen sehr zielstrebig. Probleme, die während einer Iterationsschleife auftraten, konnten in der folgenden gezielt angegangen werden. Demzufolge hätte auch bei der Entwicklung des Versuchskonzeptes früher eine Kombination der Einzelkonzepte durchgeführt werden sollen. So wäre z.B. schneller aufgefallen, dass sich zu viele Fragen für den Gesamtfragebogen angesammelt hatten, die ein Proband gar nicht mehr vollkonzentriert bearbeiten konnte.

Ein Punkt, der häufig zu Problemen führte, war die Erzeugung von störenden Umgebungsbedingungen. Zum Beispiel trat bei der Erzeugung von Störschallpegeln häufig das Problem auf, dass sich Dritte durch den Lärm gestört fühlten, und deshalb die letztendliche Durchführung von Studien verhindert wurde. Auch der Einfluss von sehr hellen Versuchsbedingungen konnte mit den momentanen Prototypen nicht untersucht werden, da die Versuchsträger noch zu empfindlich für die Nutzung im Freien sind. Dem könnte dadurch begegnet werden, dass die Prototypen für den Einsatz im Freien angepasst würden. Durch diesen Schritt könnten auch Versuche im kontrollierten Feld oder z.B. auf realen Gleisbaustellen durchgeführt werden.

Auch für den Einsatz im Freien wäre als Arbeitsaufgabe der Zusammenbau der Holzhütte geeignet. Die Studie könnte mit den Erfahrungen aus dieser Arbeit sehr ähnlich durchgeführt werden. Lediglich die Zeiten zwischen den Signalen könnten vergrößert und mit zusätzlichen



Signalen ergänzt werden. Es sollte auch darüber nachgedacht werden, eine Konsequenz für ein nicht sofort bestätigtes Signal einzuführen. Dadurch könnte dem Effekt, sich nicht wirklich in einer gefährlichen Situation zu befinden, begegnet werden.

Ein Punkt, der durch das in dieser Arbeit gewählte Versuchskonzept noch nicht abgedeckt werden konnte, wäre eine gezielte Überlastung eines Sinneskanals (z.B. visuell durch helles Sonnenlicht). Interessant wäre hier, ob das Signal dennoch erkannt werden kann oder automatisch eines der redundanten Signale zur Erkennung gewählt würde. Dieser Punkt setzt voraus, dass die Störeinflüsse gezielt auf eine Gefahrenmeldung ausgelegt werden könnten. Dies bildete das aktuelle Konzept noch nicht ab. Hier waren alle Umgebungsbedingungen durch die Durchführung im Labor bewusst konstant gehalten, um Aussagen über die generelle Eignung der Prototypen mit ihren Signalen treffen zu können. Da dies erfolgreich war, können in einem nächsten Schritt Versuche unter erschwerten Bedingungen folgen.

Innerhalb der Arbeit wurden drei Methoden zur Datenerfassung während der Versuche genutzt, diese sollen hier noch einmal reflektiert werden. Hier lieferten die Log-Files viele interessante Ergebnisse direkt aus den Versuchen. In Zukunft sollte versucht werden, an dieser Stelle noch mehr Parameter aufzuzeichnen. Der Fragebogen (siehe Anhang) erwies sich als sehr arbeitsintensiv und sollte bei weiteren Studien optimiert werden. Durch ihn konnten die meisten Ergebnisse ausgewertet werden. Die Methode der Blickbewegungsanalyse brachte nicht die gewünschten Ergebnisse, da der kleine Bildschirm während der Bedienung oft das Erfassungsfeld der Gesichtsfeldkamera verlies. Eine gezielte Auswertung von entstandenen Eingabefehlern während der Nutzung war so nicht möglich. An dieser Stelle sollte nach einer alternativen Methode gesucht werden. Trotzdem konnten die Videos zur Klärung von besonderen Situationen im Nachhinein verwendet werden. Dabei erwies sich auch die akustische Aufzeichnung als nützlich.

In Zukunft könnten das Versuchskonzept oder die entwickelten Konzepte des Informations- bzw. Warnsystems auch in anderen Bereichen eingesetzt werden.

## 7 Fazit und Ausblick

In diesem Kapitel sollen ein Fazit und ein Ausblick zu der hier vorliegenden Arbeit gezogen werden. Dies soll strukturiert nach den Punkten „Relevanz für die Forschung“ (Kapitel 7.1), „Auswirkungen für die Praxis“ (Kapitel 7.2) und „Zukünftige Fragen“ (Kapitel 7.3) ablaufen.

### 7.1 Relevanz für die Forschung

Das Interessante an der hier vorliegenden Arbeit waren die vielfältigen Entwicklungsmöglichkeiten im Bereich der Informations- bzw. Warnsysteme bezogen auf das Einsatzfeld Gleisbau. Dadurch, dass es bisher nur Bemühungen zur Entwicklung von akustischen Systemen gab, konnten innerhalb der Arbeit zusätzlich der visuelle und der taktile Kanal der menschlichen Wahrnehmung betrachtet werden. Als Alternative zur herkömmlichen akustischen Signalübertragung durch Schallwellen wurde innerhalb der Arbeit die Übertragung durch Knochenschwingungen getestet, ein Konzept, das ganz neue Möglichkeiten bietet.

Die innerhalb der Arbeit erarbeitete Methode zur Übermittlung von Kältesignalen birgt ein besonderes Potential für weitere Forschungen. Es scheint, als ob diese Methode in der Vergangenheit keine Beachtung fand. Allerdings zeigten die ersten Studien eine sehr gute Wahrnehmbarkeit des Systems. Problematisch stellt sich nur die Energieversorgung dar, hier müsste noch nach Lösungen gesucht werden.

Mit den gewonnenen Konzepten lassen sich neue Varianten von multimodalen individuellen Informations- bzw. Warnsystemen umsetzen und studieren. Gerade der ohnehin sehr beanspruchte akustische Sinneskanal lässt sich durch Ergänzung der visuellen und taktilen Konzepte entlasten.

Die Möglichkeit, durch das entwickelte Rückmeldungskonzept die Nutzerintention zu erfassen und an das System zurückzumelden, bietet einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn. Auch die Option, durch ein solches System das Verständnis verschiedener Meldungen unterscheiden zu können, vereinfacht die Einführung individueller Informations- bzw. Warnsysteme. Diese Sicherheit konnte in der Vergangenheit nur durch Sicherungspersonal erreicht werden, welches die Reaktionen der Nutzer überwacht und gesetzten Falles eingreift.

Die innerhalb dieser Arbeit erarbeiteten Gestaltungshinweise und die geprüften Konzepte mit ihren Prototypen und Signalen ermöglichen es, Antworten zu den aufgestellten Forschungsfragen zu finden. Die Arbeit liefert damit einen Grundstock an Konzepten, die zukünftig für die Entwicklung weiterer Konzepte genutzt werden können. Gerade die taktilen Konzepte

bieten die Möglichkeit, einen weiteren redundanten Kanal der menschlichen Wahrnehmung zu nutzen und damit die multimodale Signalübertragung weiter zu verbessern.

Die erarbeiteten Gestaltungshinweise zur besseren Unterscheidbarkeit der Signale und die Möglichkeit, Signale unterschiedlicher Dringlichkeit zu gestalten, legen den Grundstein zur Entwicklung von Signalkaskaden. Das Konzept dazu wurde bereits in dieser Arbeit erarbeitet und vorgestellt. Durch ein individuelles Informations- bzw. Warnsystem und den Einsatz von Signalkaskaden könnte das Situationsbewusstsein der Nutzer in sicherheitskritischen Arbeitskontexten weiter verbessert werden, denn ein ausgeprägtes Situationsbewusstsein ist wichtig für den Verlauf des Entscheidungsprozesses (Endsley, 1995; Endsley & Garland, 2000).

Um weitere Effekte dieser Arbeit aufzeigen zu können, sollen nun die Auswirkungen auf die Praxis beschrieben werden.

## 7.2 Auswirkungen auf die Praxis

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, bietet der Einsatz von individuellen Informations- bzw. Warnsystemen Vorteile für die praktische Anwendung. Es ist möglich, Benutzern in unterschiedlichen Situationen angepasste Meldungen zu übermitteln. Die vorliegende Arbeit hat dies bereits an zwei verschiedenen Meldungen getestet. Es konnten erfolgreich eine der Information dienende Warnmeldung und eine sehr dringliche Alarmmeldung übermittelt werden. Im Bereich des Gleisbaus könnten damit bereits die Handlungsanweisungen (Ro1 bis Ro3) der existierenden Signale abgedeckt werden. Allerdings würde dadurch nicht die unterschiedliche Dringlichkeit der Ro2 und Ro3 Signale erkannt (vgl. Kapitel 2.5). Dies könnte durch weitere Forschungen an Signalkombinationen gelöst werden.

Eine weitere Neuerung für die Praxis stellt die Möglichkeit einer Rückmeldung durch den Nutzer dar. Das hier entwickelte Konzept gibt den Betreibern von Informations- bzw. Warnsystemen ein Werkzeug, um die Handlungsintentionen der Nutzer besser überwachen zu können. Dadurch können im Notfall Maßnahmen ergriffen werden, die künftig Unfälle verhindern könnten. Inwieweit dadurch auch Sicherungspersonal ersetzt werden kann, müssen zukünftige Studien zeigen. Sicher ist jedoch, dass sich durch den Einsatz einer Rückmeldefunktion der arbeitsorganisatorische Aufwand reduziert.

Besonders eindrucksvoll erwies sich der Einsatz des Bone Conduction-Interfaces. Dieses könnte in weiteren Einsatzfeldern genutzt werden. Beispielsweise in Leitwarten, also einem sehr ruhigen Umfeld, könnte dieses System für die Übertragung von akustischen Signalen, aber auch Sprache genutzt werden. Der Vorteil, dass der Gehörgang frei bleibt, lässt außer-

dem eine freie Kommunikation zu. Gleichzeitig ist das System leicht und kann an unterschiedlichen Stellen am Kopf getragen werden. Der Einsatz von Bone Conduction-Systemen könnte die Erreichbarkeit der Benutzer erhöhen und damit zu einer Alternative zu den herkömmlichen Headsets werden.

Als abschließende Punkte sollen im nächsten Kapitel noch zukünftige Fragen geklärt werden.

### 7.3 Zukünftige Fragen

In diesem Kapitel soll zunächst direkt auf Verbesserungspotentiale der Prototypen eingegangen und anschließend eine mögliche Weiterführung des Forschungsvorhabens diskutiert werden.

Die LED-Brille übermittelte während der Studien sicher die visuellen Signale an den Nutzer. Ein Problem stellt allerdings die Verwendung in sehr hellen Umgebungen dar. Hier müssen Anpassungen an der Brille vorgenommen werden, um auch den Einsatz im hellen Sonnenlicht zu ermöglichen. Die durchsichtigen Bereiche der Brille wurden bereits abgeklebt, um eine direkte Blendung zu verhindern. Allerdings ist noch zu überprüfen, ob die Helligkeit der LEDs auch unter diesen Bedingungen ausreicht. Ein weiteres Problem könnte die Akzeptanz einer solch großen Brille darstellen, hier müssten evtl. kleinere Ausführungen getestet werden. Eine ganz neue Möglichkeit stellt eine im Jahr 2014 entwickelte LED-Kontaktlinse dar. Diese ermöglicht es, farbige visuelle Signale im Gesichtsfeld darzustellen. Darüber hinaus ist auch die Darstellung von Bildern geplant, was zusätzlich die Darstellung von Icons möglich machen würde (Mehler-Bicher & Steiger, 2014).

Die Entscheidung, die Icons über ein Display am Handgelenk abzubilden, erwies sich als eine gute Methode, um Informationen darzustellen. Das anfänglich benutzte HMD setzte sich aufgrund der fragilen Ausführung am Kopf nicht durch. Gestützt wird diese Entscheidung auch durch die aktuellen Entwicklungen auf dem Markt. Die Google Glasses waren eine lange Zeit ein Produkt, das in den Medien beworben wurde, allerdings nahm die anfängliche Euphorie nach immer mehr Kritiken langsam ab. Heute ist die Smartwatch in aller Munde. Zukünftig könnte eine Smartwatch das Display am Handgelenk ersetzen und damit aufwendige Entwicklungsschritte gespart werden. Die Anpassungskonstruktion einer Smartwatch an die Umgebungsbedingungen z.B. beim Gleisbau stellt daher eine gute Möglichkeit dar, schnell einen weiteren Prototyp zu entwickeln.

Das Rückmeldungskonzept könnte in Zukunft die Handlungsintentionen der Nutzer an das System übermitteln. Dies schafft einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn, kann aber die wirkli-

che Handlung des Nutzers nicht erfassen. Einen Weg dies zu ermöglichen, stellt die Ergänzung des Systems durch ein GPS-System dar. Dadurch könnte überprüft werden, ob der Nutzer sich wirklich in der sicheren Zone aufhält oder noch in Gefahr schwebt.

Ein letzter Punkt zu den Prototypen stellt die bislang unklare Energieversorgung dar. Die gängigen Akkus sind meist recht schwer und müssen häufig ersetzt werden, da sonst ein Einsatz z.B. über eine Achtstundenschicht nicht möglich wäre. Hier könnten neu entwickelte Aluminium-Ionen-Akkus Abhilfe schaffen. Diese haben den Vorteil, dass sie sehr schnell wieder geladen werden können. Eine Ladung kann in ca. zwei Minuten erfolgt sein (Gong et al., 2014). Zusätzlich sind die Akkus unempfindlich gegenüber Beschädigungen und können gebogen werden. Dies macht z.B. eine flexible Integration in die Kleidung des Nutzers möglich.

Mit dieser Arbeit konnten die Grundlagen gesetzt werden, um zukünftig weitere individuelle Informations- bzw. Warnsysteme zu entwickeln. Diese Systeme könnten z.B. durch eine individuelle Rückmeldung gezielt auf falschverstandene Gefahrenmeldungen reagieren. Gerade die thermischen Signalgeber ermöglichen es, ein sehr gut wahrnehmbares Signal umzusetzen. Ein solches Signal könnte dazu genutzt werden, den Nutzer auf einen Irrtum bzw. eine falsche Handlung hinzuweisen. Dies würde es ermöglichen, ein auf die Dringlichkeit der Situation angepasstes Informations- bzw. Warnkonzept zu entwickeln.

Durch dieses Vorhaben können die bislang nur grundlegend betrachteten taktilen Komponenten weiterentwickelt und in einem späteren Schritt mit den Prototypen dieser Arbeit zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden.

Bezogen auf zukünftige Studien sollten diese unbedingt auch auf das Feld übertragen werden (Biernath et al., 1997). Die vorliegende Arbeit liefert dazu die notwendigen Bestandteile. So kann die Arbeitsaufgabe evtl. in angepasster Form auch in Feldversuchen genutzt werden. Wie in dieser Arbeit beschrieben, ist es die Bestrebung, möglichst viel Aufmerksamkeit der Probanden auf die Aufgabe zu lenken. Wichtig wäre es bei zukünftigen Versuchen die Störeinflüsse auch auf den taktilen Bereich (z.B. über Vibrationen) zu ergänzen. Darüber hinaus müssten die visuellen Einflüsse auf Tageslichtbedingungen (z.B. Blendungseinflüsse im Sonnenlicht) erhöht werden. Der grundlegende Ablauf der Studien und die verwendeten Methoden können in angepasster Form auf zukünftige Studien angewendet werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- Abras, C., Maloney-Krichmar, D., & Preece, J. (2004). *User-Centered Design*. Great Barrington: Berkshire Publishing Group.
- Alldieck, U. (2013). *Lärmreduzierte Gleisbaustelle: Gezielte Auswahl von Sicherungsmaßnahmen kann die Schallemission beträchtlich reduzieren*. Bauportal, pp. 38–40.
- Arolt, V. (2007). *Geschlechtsspezifische Psychiatrie und Psychotherapie: Ein Handbuch*. (Rohde, A., Ed.). Stuttgart: Kohlhammer.
- Ballweg, K. (2013). *Sicherung von Menschenleben: Eine Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Alarmierung von Gleisarbeitern* (Masterthesis). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Banda, S. (2002). *Lichttechnische Berechnungen: Grundlagen - Verfahren - Eigenschaften*. mit 10 Tabellen. *Reihe Technik*. Renningen: expert-Verlag.
- Bärenz, P., Reichelt, C., & Manteuffel, J. (2014). *Feldstudien für die schnelle Vegetationspflege mit einem akustisch individuellen Warnsystem* (No. F 06-1301).
- Bauer, L., Bravo-Lillo, C., Cranor, L., & Fragkaki, E. (2013). *Warning Design Guidelines*. Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- Békésy, G. v. (1932). *Zur Theorie des Hörens bei der Schallaufnahme durch Knochenleitung*. *Annalen der Physik*, 405(1), 111–136. doi:10.1002/andp.19324050109
- Békésy, G. v., & Wever, E. G. (1989, c1960). *Experiments in hearing* (Vol. 8). New York: McGraw-Hill.
- Biernath, G., Hornberger, U., & Rätzer-Frey, A. (1997). *Literaturrecherche: Analyse automatischer Warnsysteme aus der Perspektive der Wahrnehmungspsychologie*. Mannheim.
- Bliss, J. P., & Fallon, C. K. (2006). *Active warnings: False alarms*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 231–242). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Blümel, P. A. (2014). *Entwicklung und Realisierung eines Versuchskonzeptes für ein visuelles Warnsystem mit Rückmeldungsfunktion* (Bachelorthesis). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Bokranz, R., & Landau, K. (1991). *Einführung in die Arbeitswissenschaft: Analyse und Gestaltung von Arbeitssystemen*. *Uni-Taschenbücher*. Stuttgart: E. Ulmer.
- Bortz, J., & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler: Mit 87 Tabellen* (4., überarb. Aufl.). *Springer-Lehrbuch Bachelor, Master*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

- Clauss, W., & Clauss, C. (2009). *Humanbiologie kompakt. Bachelor*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Cohen, H.H., Cohen, J., Mendat, C.C., Wogalter, M.S. (2006). *Warning channel: modality and media*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 123–134). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Crawford, A. (1963). *The perception of light signals: The effect of mixing flashing and steady irrelevant lights*. *Ergonomics*, 6(3), 287–294. doi:10.1080/00140136308930708
- Dantscher, S., & Sauer, U. (2011). *Einheitssignal für die Warnung bei Gleisbauarbeiten*. Bauportal, pp. 38–41.
- Dewar, R. E. (2006). *Road warnings with traffic control devices*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 177–185). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Eash, C. E., Mc Lean, W. E., Mozo, B. T., Licina, J. R., & McEntire, B. J. (1999). *Human Factors and Performance Concerns for the Design of Helmet-Mounted Displays*. U. S. Army Aeromedical Research Laboratory,
- Edworthy, J., & Hellier, E. (2006). *Complex nonverbal auditory signals and speech warnings*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 199–220). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Edworthy, J., Loxley, S., & Dennis, I. (1991). *Improving Auditory Warning Design: Relationship between Warning Sound Parameters and Perceived Urgency*. *Human Factors*, 33(2), 205–231.
- Eisenbahn-Unfallkasse (2005). *Europäische Normung automatischer Warnsysteme*. TIEFBAU.
- Endsley, M. R. (1995). *Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems*. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 37(1), 32–64. doi:10.1518/001872095779049543.
- Endsley, M. R., & Garland, D. J. (2000). *Situation awareness: Analysis and measurement*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Eysel, U. (2006). *Sehen*. In R. F. Schmidt & H.-G. Schaible (Eds.), *Neuro-und Sinnesphysiologie* (pp. 243–286). Berlin: Springer.
- Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8., vollst. überarb. Aufl. 2013). Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg.

- Ferris, T. K., & Sarter, N. B. (2008). *Cross-Modal Links Among Vision, Audition, and Touch in Complex Environments*. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(1), 17–26. doi:10.1518/001872008X250566.
- Früh, K. F., & Ahrens, W. (2009). *Handbuch der Prozessautomatisierung: Prozessleittechnik für verfahrenstechnische Anlagen* (4., überarb. Aufl.). München: Oldenbourg.
- Gong, M., Li, Y., Zhang, H., Zhang, B., Zhou, W., Feng, J., . . . Dai, H. (2014). *Ultrafast high-capacity NiZn battery with NiAlCo-layered double hydroxide*. *Energy & Environmental Science*, 7(6). doi:10.1039/c4ee00317a.
- Haas, E., & Edworthy, J. (2006). *An introduction to auditory warnings and alarms*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 189–198). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Handwerker, H. O. (2006). *Somatosensorik*. In R. F. Schmidt & H.-G. Schaible (Eds.), *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Berlin: Springer.
- Hartmann, L., & Miller, B. (2013). *Erarbeitung und Testen von zwei Konzepten für ein taktiles Warnsystem von Personen* (Bachelorthesis). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Heidl, M. J. (2011). *Entwickeln und Testen eines Versuchskonzeptes für ein Warnsystem mit Rückmeldungsinterface* (Bachelorthesis). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Hellbrück, J., & Ellermeier, W. (2004). *Hören: Physiologie, Psychologie und Pathologie* (2. aktualisierte und erw. Aufl.). Göttingen [u.a.]: Hogrefe, Verl. für Psychologie.
- Henry, P., & Letowski, T. R. (2007). *Bone Conduction: Anatomy, Physiology and Communication*.
- Hoffmann, J., & Gayko, J. E. (2012). *Fahrerwarnelemente*. In H. Winner (Ed.), *ATZ-MTZ-Fachbuch. Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort ; mit 45 Tabellen* (2nd ed., pp. 343–354). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Huber, F., Meyer, F., & Lenzen, M. (2014). *Konzeption und Durchführung von Experimenten*. In F. Huber, F. Meyer, & M. Lenzen (Eds.), *Grundlagen der Varianzanalyse* (pp. 23–42). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Johannsen, G. (1993). *Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Junghans, K. (2013). *Entwicklung von vibro-akustischen Warnsignalen ausgelegt für die Nutzung eines Earbone-Conduction Interfaces bei Arbeiten unter schwierigen Umgebungsbedingungen* (Bachelorthesis). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.



- Kahle, W., & Frotscher, M. (2002). *Nervensystem und Sinnesorgane* (8., korr. Aufl). *Taschenatlas der Anatomie: Vol. 3*. Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Kalsher, M. J., & Williams, K. J. (2006). *Behavioral compliance: theory, methodology and results*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 313–331). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Kellersmann, B. (2012). *Entwicklung und Realisierung eines Versuchskonzeptes für visuelle Warnsysteme für Personen, basierend auf einem Head-Mounted Display* (Diplomarbeit). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Klinke, R., Pape, H.-C., Kurtz, A., & Silbernagl, S. (2010). *Physiologie* (6., vollständig überarb. Aufl). Stuttgart [u.a.]: Thieme.
- Klusendick, M. (2007). *Kognitionspsychologie*. In G. Naderer & E. Balzer (Eds.), *Qualitative Marktforschung in Theorie und Praxis* (pp. 103–117). Wiesbaden: Gabler.
- Koether, R. (2001). *Betriebsstättenplanung und Ergonomie: Planung von Arbeitssystemen; mit 64 Tabellen sowie Fallbeispielen und Übungsaufgaben*. München, Wien: Hanser.
- Kwiotek, P., Schad, R., Yanza, R. D. P., & Casteels, S. (2011). *Entwicklung und Erprobung von Prototypen zur visuellen und akustischen Warnung von Personen* (Advanced Design Project). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Laughery, K. R., & Wogalter, M. S. (2014). *A three-stage model summarizes product warning and environmental sign research*. *Safety Science*, 61, 3–10.  
doi:10.1016/j.ssci.2011.02.012.
- Luczak, H. (1975). *Untersuchungen informatorischer Belastung und Beanspruchung des Menschen. Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften Reihe 10, Angewandte Informatik, elektronische Datenverarbeitung: Nr. 2*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Malter, B., & Guski, R. (2001). *Gestaltung von Gefahrensignalen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Fb, Forschung: Vol. 935*. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW.
- Manteuffel, J. (2013). *Die individuelle Warnung – Möglichkeiten und Risiken für das Arbeiten im bzw. am Gleisbereich*. *Bauportal*, pp. 26–29.
- Manteuffel, J., & Bärenz, P. (2012). *Beurteilung des Einsatzes der individuellen Warnung für bestimmte Arbeitsstellen im bzw. am Gleisbereich – insbesondere unter Berücksichtigung der Trageakzeptanz von individuellen Warngeräten*. F 06-1101. Mannheim.

- Mayhorn, C. B., & Podany, K. I. (2006). *Warnings and aging: Describing the receiver characteristics of older adults*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 355–361). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Mayhorn, C. B., Wogalter, M. S., & Laughery, K. R. (2014). *Special issue on warnings: Advances in delivery, application, and methods*. *Applied Ergonomics*, 45(5), 1267–1269. doi:10.1016/j.apergo.2014.02.012
- McBride, M., Letowski, T. R., & Tran, P. K. (2005). *Bone Conduction Head Sensitivity Mapping: Bone Vibrator*.
- McDougald, B. R., & Wogalter, M. S. (2014). *Facilitating pictorial comprehension with color highlighting*. *Applied Ergonomics*, 45(5), 1285–1290. doi:10.1016/j.apergo.2013.05.008.
- Meh, D., & Denislic, M. (1994). *Quantitative assessment of thermal and pain sensitivity*. *Journal of the neurological sciences*, 127(2), 164–169.
- Mehler-Bicher, A., & Steiger, L. (2014). *Augmented Reality: Theorie und Praxis*: De Gruyter.
- Moshhammer, H., & Kundi, M. (2013). *Medizinische Beurteilungsgrundlagen der Passiven Blendung*.
- Myles, K., & Binseel, M. S. (2007). *The tactile modality: a review of tactile sensitivity and human tactile interfaces*.
- Neudörfer, A. (2013). *Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie* (5., vollständig neu bearbeitete und aktualisierte Aufl). Berlin: Springer Vieweg.
- Noy, Y. I., & Karwowski, W. (2005). *Handbook of human factors in litigation*. Boca Raton, Fla: CRC Press.
- Patterson, R. D., & Mayfield, T. F. (1990). *Auditory Warning Sounds in the Work Environment [and Discussion]*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 327(1241), 485–492. doi:10.1098/rstb.1990.0091.
- Patterson, R. D. (1982). *Guidelines for auditory warning systems on civil aircraft. CAA paper: Vol. 82017*. London: Civil Aviation Authority.
- Pfendler, C., Wid, H., & Schlick, C. (2005). *Bewertung eines Head-Mounted- und eines Hand-Held Displays bei einer Zielerkennungsaufgabe* (Beiträge aus der Zeitschrift für Arbeitswissenschaft): Ergonomia.
- Porac, C., & Coren, S. (1981). *Lateral preferences and human behavior*. New York: Springer.

- Rabke, S. (2014). *Entwicklung und Realisierung eines Versuchskonzeptes für ein vibro-akustisches Warnsystem mit Rückmeldungsfunktion* (Bachelorthesis). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Rash, C. E. (Ed.). (2009). *Helmet-mounted displays: Sensation, perception, and cognition issues*. Fort Rucker, Ala: U.S. Army Aeromedical Research Laboratory.
- Ringwald, J., Saul, S., Wagner, P., Wedel, M., & Wurst, B. (2011). *Weiterentwicklung und Erprobung von Prototypen zur visuellen und akustischen Warnung von Personen* (Advanced Design Project). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Röbig, S. (2015). *Untersuchung der taktilen Wahrnehmung für die Gestaltung konkaver Rückmeldungen* (Dissertation). TU Darmstadt, Darmstadt.
- Roth, E., Heidenreich, K., & Holling, H. (1999). *Sozialwissenschaftliche Methoden: Lehr- und Handbuch für Forschung und Praxis* (5., durchgesehene Aufl.). *Lehr- und Handbücher der Sozialwissenschaften*. München: Oldenbourg.
- Rousseau, G. K., & Wogalter, M. S. (2006). *Research on warning signs*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 147–158). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Salvendy, G. (2012). *Handbook of Human Factors and Ergonomics*: Wiley.
- Sarodnick, F., & Brau, H. (2011). *Methoden der Usability Evaluation: Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung* (2., überarb. und aktualisierte Aufl.). *Wirtschaftspsychologie in Anwendung*. Bern: Huber.
- Sauer, U. (2003). *Akustische Hintergründe der AWS-Richtlinie der DB NETZ AG*, pp. 413–416.
- Sauer, U. (2006). *Akustische Grundlagen für die Anordnung Automatischer Warnsysteme (AWS)*, pp. 380–384.
- Schlick, C. M., Bruder, R., & Luczak, H. (Eds.). (2010). *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schmidt, L., Schlick, C., & Grosche, J. (2008). *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin: Springer.
- Schmidt, R. F., & Schaible, H.-G. (Eds.). (2006). *Neuro-und Sinnesphysiologie*. Berlin: Springer.
- Schönpflug, W., & Schönpflug, U. (1997). *Psychologie: Allgemeine Psychologie und ihre Verzweigungen in die Entwicklungs-, Persönlichkeits- und Sozialpsychologie ; ein Lehrbuch für das Grundstudium* (4. Aufl). *Psychologie Lehrbuch*. Weinheim: Beltz [u.a.].

- Schönsleben, P. (2013). *Praktische Betriebsinformatik: Konzepte logistischer Abläufe*: Springer Berlin Heidelberg.
- Schultheis, M., Wakula, J., Röbig, S., & Bruder, R. (2012). *Entwicklung und Erprobung von Prototypen zur taktilen Warnung von Menschen in schwierigen Arbeitsbedingungen*. In *Usability Professionals. 2012* (pp. 296–301).
- Schultheis, M., Wakula, J., Theuerling, H., & Bruder, R. (2011). *Entwicklung eines Versuchskonzeptes zur visuellen, akustischen und taktilen Warnung im Bereich des Gleisbaus*. In *Fortschritt-Berichte VDI. Mensch-Maschine-Systeme*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Schweizer, J. G. (2006). *Akustische Warngeräte für Gleisbaustellen*. EI – Eisenbahningenieur, (9), 76–83.
- Seminatore, A. A., Ghelardoni, L., Ceccarelli, A., Falai, L., Schultheis, M., & Malinowsky, B. (2012). *ALARP (A Railway Automatic Track Warning System Based on Distributed Personal Mobile Terminals)*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48, 2081–2090.
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1964). *The mathematical theory of communication*. Urbana: University of Illinois Press.
- Silbernagl, S., & Despopoulos, A. (2012). *Taschenatlas Physiologie* (8., überarb. und erw. Aufl). Stuttgart: Thieme.
- Sommerlatte, J., Nielsch, K., & Böttner, H. (2007). *Thermoelektrische multitalente*. *Physik Journal* 6, (5), 35.
- Stanford, L. M., McIntyre, J. W., & Hogan, J. T. (1985). *Audible alarm signals for anaesthesia monitoring equipment*. *International journal of clinical monitoring and computing*, 1(4), 251–256.
- Stanford, L. M., McIntyre, J. W., Nelson, T. M., & Hogan, J. T. (1988). *Affective responses to commercial and experimental auditory alarm signals for anaesthesia delivery and physiological monitoring equipment*. *International journal of clinical monitoring and computing*, 5(2), 111–118.
- Stapelkamp, T. (2007). *Screen- und Interfacedesign: Gestaltung und Usability für Hard- und Software*. Berlin [u.a.]: Springer.
- Stapelkamp, T. (2009). *Web X.0: Erfolgreiches Webdesign und professionelle Webkonzepte Gestaltungsstrategien, Styleguides und Layouts für stationäre und mobile Medien* (1st ed.). Berlin: Springer.

- Stapelkamp, T. (2010). *Interaction- und Interfacedesign: Web-, Game-, Produkt- und System-design Usability und Interface als Corporate Identity* (1. Aufl). X.media.press. Berlin [u.a.]: Springer.
- Stevens, J. C., & Choo, K. K. (1998). *Temperature sensitivity of the body surface over the life span*. Somatosensory & motor research, 15(1), 13–28.
- Stevens, S. S. (1957). *On the psychophysical law*. Psychological Review, 64(3), 153–181. doi:10.1037/h0046162.
- Swissphone Telecommunications GmbH. (2013). *BOSS 935 – der Melder, der sich Ihren Wünschen anpasst*. Swissphone News, (11-2013).
- Tondera, T. (2013). *Erarbeitung und Testen von Icons für ein visuelles, handygebundenes Warnsystem von Personen* (Bachelorthesis). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Tsukada, K., & Yasumura, M. (2004). *ActiveBelt: Belt-Type Wearable Tactile Display for Directional Navigation*. In D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, J. M. Kleinberg, F. Mattern, J. C. Mitchell, . . . I. Siio (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science. UbiComp 2004: Ubiquitous Computing* (pp. 384–399). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Van Cott, H. P., & Kinkade, R. G. (1972). *Human Engineering Guide to Equipment Design*. Revised Edition. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
- van Erp, J. B. (2002). *Guidelines for the Use of Vibro-Tactile Displays in Human Computer Interaction*. Edinburgh.
- van Erp, J. B., & Self, B. P. (2008). *Tactile displays for orientation, navigation and communication in air, sea and land environments*. RTO technical report: TR-HFM-122. Neuilly-sur-Seine Cedex, France: North Atlantic Treaty Organisation, Research & Technology Organisation.
- van Erp, J. B., & van Veen, H. A. (2003). *A multipurpose tactile vest for astronauts in the international space station*. Proceedings of eurohaptics, 405–408.
- Velden, M. (1982). *Die Signalentdeckungstheorie in der Psychologie*. Kohlhammer-Standards Psychologie : Studententext : Teilgebiet: Methoden. Stuttgart, Berlin, Köln, Mainz: Kohlhammer.
- von Campenhausen, C. (1981a). *Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung. Die Sinne des Menschen: Band 1*. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verl.
- von Campenhausen, C. (1981b). *Anleitung zu Beobachtungen und Experimenten. Die Sinne des Menschen: Band 2*. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verl.

- Wakula, J., Schultheis, M., Bruder, R., & Kalenahalli Sudarshan, P. (2011). *Developing and testing of warning / alerting systems for railway trackside workers*. Chennai ,India.
- Walker, B., & Stanley, R. M. (2009). *Intelligibility of bone-conducted speech at different locations compared to air-conducted speech*. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, pp. 1086–1090.
- Walter, K. (2007). *Regionale Ergebnisse des Schienenverkehrs 2005*.
- Weber, B., Schatzle, S., Hulin, T., Preusche, C., & Deml, B. (2011). *Evaluation of a vibrotactile feedback device for spatial guidance*. In *2011 IEEE World Haptics Conference (WHC 2011)* (pp. 349–354).
- Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Wickens, T. D. (2002). *Elementary signal detection theory*. Oxford, New York: Oxford University Press.
- Wogalter, M. S. (2006a). *Communication-Human Information Processing (C-HIP) Model*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 51–62). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wogalter, M. S. (Ed.). (2006b). *Handbook of warnings*. Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wogalter, M. S., & Cox III, E. p. (2006). *Warning Source*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 111–122). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wogalter, M. S., DeJoy, D. M., & Laughery, K. R. (Eds.). (1999). *Warnings and risk communication*. London, Philadelphia, PA: Taylor & Francis.
- Wogalter, M. S., Silver, C. N., Leonard, D. S., & Zaikina, H. (2006). *Warning symbols*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 159–176). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wogalter, M. S., & Vigilante, W. J. (2006). *Attentinn switch and maintenance*. In M. S. Wogalter (Ed.), *Handbook of warnings* (pp. 245–265). Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Associates.
- Yilmaz, C. (2014). *Weiterentwicklung und Testen einer Rückmeldefunktion eines personengebundenen Warnsystems* (Bachelorthesis). TU Darmstadt, Darmstadt, nicht veröffentlicht.
- Zenner, H. P. (2006). *Hören*. In R. F. Schmidt & H.-G. Schaible (Eds.), *Neuro-und Sinnesphysiologie* (pp. 287–311). Berlin: Springer.

ZÖLLNER GmbH (2004). *Einbindung von Funk in die Gleisbaustelle*. TIEFBAU, Zühlke, D. (2012). *Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen: Ueware-Engineering für technische Systeme*: Springer.

## 8.1 Vorschriften und Normen

BGI 523 "*Mensch und Arbeitsplatz*" (2001). Köln: Carl-Heymanns Verlag KG.

BGI 579 "*Hitzearbeit Erkennen – beurteilen – schützen*" (2013). Mainz.

BGI 650 "*Bildschirm- und Büroarbeitsplätze - Leitfaden für die Gestaltung*" (2012). Wiesbaden: BC GmbH Verlags- und Mediengesellschaft.

BGI 5081 "*Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz am Bau*" (07/2012). Berlin.

DGUV Information 201-021 "*Sicherheitshinweise für Arbeiten im Gleisbereich von Eisenbahnen*" (2013).

DGUV Regel 101-024 "*Sicherungsmaßnahmen bei Arbeiten im Gleisbereich von Eisenbahnen*" (2008).

DGUV Vorschrift 23 "*Wach- und Sicherungsdienste*" (2005).

DGUV Vorschrift 78 "*Arbeiten im Bereich von Gleisen*" (1994).

DIN 4844-1 "*Graphische Symbole – Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen – Teil 1: Erkennungsweiten und farb- und hotometrische Anforderungen,*" (2011). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 5340 "*Begriffe der physiologischen Optik*" (1998). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 5381 "*Kennfarben,*". Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 614-1 "*Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze*" (2009). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 842 "*Sicherheit von Maschinen - Optische Gefahrensignale - Allgemeine Anforderungen, Gestaltung und Prüfung*" (2009). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 894-2 "*Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 2: Anzeigen*" (2009). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 981 "*Sicherheit von Maschinen - System akustischer und optischer Gefahrensignale und Informationssignale*" (2009). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN EN 60945 "*Navigations- und Funkkommunikationsgeräte und -systeme für die Seeschifffahrt*" (2002). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN EN 61310-1 "*Sicherheit von Maschinen - Anzeigen, Kennzeichen und Bedienen - Teil 1: Anforderungen an sichtbare, hörbare und tastbare Signale*" (2008). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-8 "*Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten Teil 8: Anforderungen an Farbdarstellungen*" (1998). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN ISO 3864-1 "*Graphische Symbole – Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen – Teil 1: Gestaltungsgrundlagen für Sicherheitszeichen und Sicherheitsmarkierungen*" (2012). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN ISO 3864-2 "*Graphische Symbole - Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen - Teil 2: Gestaltungsgrundlagen für Sicherheitsschilder zur Anwendung auf Produkten*" (2008). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN ISO 3864-3 "*Graphische Symbole – Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen – Teil 3: Gestaltungsgrundlagen für graphische Symbole zur Anwendung in Sicherheitszeichen*" (2012). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 7731 "*Ergonomie - Gefahrensignale für öffentliche Bereiche und Arbeitsstätten - Akustische Gefahrensignale*" (2008). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-12 "*Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeit mit Bildschirmgeräten - Teil 12: Informationsdarstellung*" (2000). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-110 "*Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*" (2008). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-210 "*Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*" (2011). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-302 "*Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 302: Terminologie für elektronische optische Anzeigen*" (2009). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 9241-303 "*Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 303: Anforderungen an elektronische optische Anzeigen*" (2012). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 12100 "*Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung*" (2013). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 14738 "*Sicherheit von Maschinen - Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen*" (2009). Berlin: Beuth Verlag GmbH.



- DIN EN ISO 15008 "*Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen – Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug (I)*" (2011). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ERRI A 158/RP 3 Teil I. *Systeme zur individuellen Warnung von Personen im Gleisbereich: Pflichtenheft für individuelle und kollektive Warnsysteme für Personen im Gleisbereich.* (1996): ERRI.
- Richtlinie 89/391/EWG "*Richtlinie 89/391/EWG des Rates über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit*" (2008): Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg.
- Satow, S., & Bernard, M. (2007). *Aktualisierung der Einsatzrichtlinie für automatische Warnsysteme (AWS) - Richtlinie 479.* TIEFBAU, (7), 432–435.
- VDI/VDE 3546 Blatt 5 "*Konstruktive Gestaltung von Prozeßleitwarten; Anordnung von Monitoren*" (2001). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI/VDE 3850 Blatt 1 "*Gebrauchstaugliche Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen - Konzepte, Prinzipien und grundsätzliche Empfehlungen*" (2014). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

## 8.2 Internetquellen

- ADAC e.V. (2014). *Verkehrszeichen in Deutschland.* <http://www.adac.de> (zuletzt geprüft am: 18.12.2014).
- BHM-Tech Produktionsgesellschaft. (2014). *Bone Conductor KH20-31: Technical Data.* [http://www.bhm-tech.at/pdf/de\\_en/KH20\\_31\\_en.pdf](http://www.bhm-tech.at/pdf/de_en/KH20_31_en.pdf) (zuletzt geprüft am: 27.01.2015).
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. (2014). *Straßenverkehrs-Ordnung: StVO.* [www.juris.de](http://www.juris.de) (zuletzt geprüft am: 22.10.2014).
- Engelberger AG. (2008). *Myvu personal media viewer.* [http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=myvu%20crystal%20datasheet&source=web&cd=9&ved=0CJUBEBYwCA&url=http%3A%2F%2Fshop.engelberger.ch%2Fi2cmsdata%2Fengelberger%2Fdatasheet%2FDA\\_104901\\_1.pdf&ei=SHDjTsacDdmOsAa4q62OCQ&usg=AFQjCNHY\\_iRHwUlcEJUMsUpRdnY1ToX5yw&cad=rja](http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=myvu%20crystal%20datasheet&source=web&cd=9&ved=0CJUBEBYwCA&url=http%3A%2F%2Fshop.engelberger.ch%2Fi2cmsdata%2Fengelberger%2Fdatasheet%2FDA_104901_1.pdf&ei=SHDjTsacDdmOsAa4q62OCQ&usg=AFQjCNHY_iRHwUlcEJUMsUpRdnY1ToX5yw&cad=rja) (zuletzt geprüft am: 11.11.2011).
- Eurotech. (2014). *Wearable Computers.* [www.eurotech.com](http://www.eurotech.com) (zuletzt geprüft am: 01.12.2014).
- Industrial Scientific. (2015). *Ventis™ MX4 Produkthandbuch.* <http://www.indsci.de> (zuletzt geprüft am: 05.07.2015).

Lagercrantz Group AB. (2015). *When the seconds count*.

<http://www.lagercrantz.com/en/Operations/Short-facts21/When-the-seconds-count/> (zuletzt geprüft am: 27.01.2015).

Lewandowski, A. (2015). *Vorteile und Alleinstellungsmerkmale von D2SENSE*.

<http://www.comnovo.de> (zuletzt geprüft am: 11.07.2015).

Lindbloom, B. J. (2003). *Bruce Lindbloom.com*. <http://www.brucelindbloom.com> (zuletzt geprüft am: 07.08.2014).

Pöhlker, R. (2012). *Digitale Meldeempfänger der nächsten Generation*.

[http://www.feuerwehrsteinfurt.de/aktuelles.html?&tx\\_ttnews%5Bday%5D=05&tx\\_ttnews%5Bmonth%5D=11&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=981&tx\\_ttnews%5Byear%5D=2012&cHash=665c1cc06edd8076b05c268fad07ae06](http://www.feuerwehrsteinfurt.de/aktuelles.html?&tx_ttnews%5Bday%5D=05&tx_ttnews%5Bmonth%5D=11&tx_ttnews%5Btt_news%5D=981&tx_ttnews%5Byear%5D=2012&cHash=665c1cc06edd8076b05c268fad07ae06) (zuletzt geprüft am: 25.01.2015).

RAL, g. G. (2014). *RAL Farben*. <http://www.ral-farben.de> (zuletzt geprüft am: 14.12.2014).

Scholz, P. & Schombierski, W. (2011). *Unfall auf ICE-Strecke: Lokführer leitete vergeblich Bremsung ein*. <http://www.thueringer-allgemeine.de/startseite/detail/-/specific/Unfall-auf-ICE-Strecke-Lokfuehrer-leitete-vergeblich-Bremsung-ein-258356395> (zuletzt geprüft am: 24.07.2014).


Sennheimer.com. *OCX 685i SPORTS Black*. [http://en-](http://en-de.sennheiser.com/images/1636/3145/square/7590/square_louped_square_louped_OCX_685i_sports_01_sq_sennheiser.jpg)

[de.sennheiser.com/images/1636/3145/square/7590/square\\_louped\\_square\\_louped\\_OCX\\_685i\\_sports\\_01\\_sq\\_sennheiser.jpg](http://en-de.sennheiser.com/images/1636/3145/square/7590/square_louped_square_louped_OCX_685i_sports_01_sq_sennheiser.jpg) (zuletzt geprüft am: 25.08.2014).

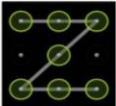
Swissphone Telecommunications GmbH. (2014). *RES.Q – das System für ein neues Alarmierungszeitalter: Alarmierung · Rückmeldung · Lokalisierung*. [www.swissphone.de](http://www.swissphone.de) (zuletzt geprüft am: 25.01.2015).

## 9 Anhang

### 9.1 Fragebogen zu den Studien


Technische Universität Darmstadt  
Institut für Arbeitswissenschaft

**Allgemeine Fragen zur Person** VP-Nr.: \_\_\_\_\_

1.	Wie alt sind Sie?	_____ Jahre	
2.	Geschlecht:	männlich <input type="checkbox"/>	weiblich <input type="checkbox"/>
3.	Sind Sie	rechtshändig <input type="checkbox"/>	linkshändig <input type="checkbox"/>
4.	Höchster Bildungsabschluss	Volks-/Hauptschulabschluss <input type="checkbox"/> Realschulabschluss <input type="checkbox"/> Fachhochschul-/Hochschulreife oder höher <input type="checkbox"/>	
7.	Beschäftigung	Angestellter <input type="checkbox"/> Student/-in <input type="checkbox"/> Anderes: _____	
10.	Haben Sie Erfahrung im Umgang mit Touchscreens/ Smartphones?	Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Falls "Ja", wie oft: <input type="checkbox"/> Selten, nur zum Telefonieren und SMS schreiben <input type="checkbox"/> Häufig, zum Telefonieren, SMS und E-Mail schreiben. <input type="checkbox"/> Häufig, zum Telefonieren, SMS, E-Mail und Spiele spielen.	
11.	Entsperren Sie ihr Smartphone mittels eines Musters? z.B. 	Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/>	
12.	Leiden sie an einer Farbfehlsichtigkeit (zB Rot-Grün-Blindheit) oder einer anderer Fehlsichtigkeit?	Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Falls „Ja“, welche: _____	
13.	Tragen Sie eine Brille oder Kontaktlinsen?	Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Falls „Ja“, was tragen sie heute? _____	
14.	Sind Ihnen Hörschäden bekannt?	Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Falls „Ja“, welche: _____	
15.	Haben Sie an vorherigen Studien mit dem Thema „visuelle Warnsysteme“ teilgenommen?	Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Falls „Ja“, welche: _____	

**System Usability Scale**

Aussage	Ich stimme vollständig zu.	Ich stimme eher zu.	Ich lehne weder ab noch stimme ich zu.	Ich lehne eher ab.	Ich lehne vollständig ab.
1. Ich denke, dass ich (als Gleisarbeiter) das System gerne benutzen würde.					
2. Ich empfinde das System als unnötig.					
3. Ich denke, das System ist einfach zu nutzen.					
4. Ich denke, ich würde die Hilfe eines Technikers benötigen, um das System benutzen zu können.					
5. Ich halte die verschiedenen Funktionen des Systems für gut integriert.					
6. Ich halte das System für inkonsistent.					
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Leute das System schnell zu beherrschen lernen.					
8. Ich empfinde das System als sehr mühsam zu benutzen.					
9. Ich fühle mich bei der Benutzung des Systems sehr sicher.					
10. Ich musste viele Dinge lernen, bevor ich das System benutzen konnte.					

Im Folgenden werden Ihnen verschiedene Fragen zum verwendeten Warnsystem gestellt. Wir bitten Sie, den vorliegenden Fragebogen vollständig auszufüllen.




Bitte lesen Sie die Fragen aufmerksam und beantworten sie diese möglichst zügig, ohne lange zu überlegen. Beachten Sie bitte zudem, dass es hierbei um Ihre persönliche Einschätzung geht - es gibt also keine falschen Antworten! Sollten während der Bearbeitung Fragen auftreten, können Sie diese gern jederzeit stellen.





### Allgemeine Verständnisfragen zum Warnsystem

Bitte stellen Sie sich hierfür folgendes Grundszenario vor:



Sie sind ein Gleisarbeiter und befinden sich auf einem Abschnitt mit zwei parallel zueinander verlaufenden Gleisen. Auf Gleis 1 werden aktuell Reparaturarbeiten durchgeführt und wird eingeschränkt befahren. Gleis 2 wird regulär befahren. Zur Gewährleistung Ihrer Sicherheit verwenden Sie das bereits vorgestellte Warnsystem.

<b>Situation Nr. 1:</b> <b>Sie überqueren gerade das frei befahrbare Gleis 2, als sich in der Nähe die Schranken eines Bahnübergangs zu schließen beginnen. Gleichzeitig sehen sie, dass die ersten Arbeiter das Arbeitsgleis räumen.</b>		
17	Welches Gefahrensignal erwarten Sie vom System, wenn Sie auf Gleis 2 stehen bleiben?	<input type="checkbox"/> Alarm <input type="checkbox"/> Warnung
18	Welches Gefahrensignal erwarten Sie, wenn Sie auf Gleis 1 (Arbeitsgleis) zurückkehren?	<input type="checkbox"/> Alarm <input type="checkbox"/> Warnung



<b>Unabhängig von Situation 1:</b>		
19	Allgemein: Handelt es sich bei folgendem Eingabemuster um eine gültige Eingabe?  Welche Reaktion erwarten Sie vom System?	<input type="checkbox"/> Ja, die Rückmeldung ist bei korrekter Eingabe erfolgreich, der neutrale Bildschirm erscheint. <input type="checkbox"/> Nein, die Eingabe wird nicht akzeptiert und muss erneut erfolgen.
20	Allgemein: Handelt es sich bei folgendem Eingabemuster um eine gültige Eingabe?  Welche Reaktion erwarten Sie vom System?	<input type="checkbox"/> Ja, die Rückmeldung ist bei korrekter Eingabe erfolgreich, der neutrale-Bildschirm erscheint. <input type="checkbox"/> Nein, die Eingabe wird nicht akzeptiert und muss erneut erfolgen.
21	Allgemein: Handelt es sich bei folgendem Eingabemuster um eine gültige Eingabe?  Welche Reaktion erwarten Sie vom System?	<input type="checkbox"/> Ja, die Rückmeldung ist bei korrekter Eingabe erfolgreich, der neutrale-Bildschirm erscheint. <input type="checkbox"/> Nein, die Eingabe wird nicht akzeptiert und muss erneut erfolgen.

<b>Situation Nr. 2:</b> <b>Sie arbeiten aktuell auf Gleis 1 und bemerken in der Ferne einen Zug, der sich auf Ihrem Gleis nähert.</b>	
22	<p>Welche Signalkombination erwarten Sie über das Warnsystem zu erhalten?</p> <p> <input type="checkbox"/> Akustisches Signal "Alarm" +   <input type="checkbox"/> Akustisches Signal "Alarm" +   <input type="checkbox"/> Akustisches Signal "Warnung" +   <input type="checkbox"/> Akustisches Signal "Warnung" +  </p>


Bitte ordnen Sie die visuellen Signale korrekt zu:


		Zug kommt auf Gleis 1 (Arbeitsgleis)	Zug kommt auf Gleis 2 (Nachbargleis)
23	 gelb blinkend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	 rot blinkend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bitte ordnen Sie die Eingabemuster korrekt zu:



		Zug kommt auf Gleis 1 (Arbeitsgleis)	Zug kommt auf Gleis 2 (Nachbargleis)
25		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Fragen zur Darstellung auf dem Display am Handgelenk:**

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
27	Das Icon "Alarm" war auf dem Display deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28	Das verwendete Icon ist zur Darstellung der Meldung "Alarm" angemessen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
29	Wenn nicht "voll und ganz zutreffend", bitte erläutern:					

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
30	Das Icon "Warnung" war auf dem Display deutlich zu erkennen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
31	Das verwendete Icon ist zur Darstellung der Meldung "Warnung" angemessen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
32	Wenn nicht "voll und ganz zutreffend", bitte erläutern:					

**Fragen zum Rückmeldeprozess des Warnsystems über das Grid**

	Das Eingabemuster ist intuitiv.	trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
33	Alarm 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
34	Warnung 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
35	Das Eingabemuster „Dreieck“ eignet sich für die Rückmeldung des Signals „Alarm“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
36	Das Eingabemuster „Viereck“ eignet sich für die Rückmeldung des Signals „Warnung“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>


	Die Zuordnung des Eingabemusters zu dem jeweiligen Icon ist eindeutig	trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
37	Alarm  + 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
38	Warnung  + 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
39	Das Eingabemuster zur Bestätigung der Meldung "Alarm" ist schnell zu verinnerlichen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
40	Das Eingabemuster zur Bestätigung der Meldung "Warnung" ist schnell zu verinnerlichen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

41	Die Erlernbarkeit des Rückmeldeprozesses insgesamt ist einfach.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
----	---	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------



### Fragen zur Eingabe der Rückmeldung über das Grid

	Die Eingabe des Musters ist unproblematisch.	trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
42	Alarm 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
43	Wenn nicht "voll und ganz zutreffend", bitte erläutern:					
44	Warnung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
45	Wenn nicht "voll und ganz zutreffend", bitte erläutern:					

	Das Icon im Hintergrund des Grids ist gut erkennbar.	trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
46	Alarm 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
47	Warnung 	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
48	Die Helligkeit der Umgebung hat bei Eingabe der Rückmeldung am Display gestört.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

49	Die zur Eingabe notwendigen Punkte auf dem Grid sind gut erkennbar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
50	Wenn nicht "voll und ganz zutreffend", bitte erläutern:					

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
51	Bei Eingabe der Punkte auf dem Grid kam es zur Falsch Auswahl von Punkten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
52	Wenn nicht "trifft ganz und gar nicht zu", bitte erläutern:					

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
53	Die Bedienung des Rückmeldesystems insgesamt ist einfach.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
54	Bei Eingabe der Rückmeldung über das Grid sind Probleme aufgetreten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
55	Wenn nicht "ganz und gar nicht zutreffend", bitte erläutern: (Mehrfachnennungen möglich)	<input type="checkbox"/> Ich konnte die Punkte nicht gut erkennen. <input type="checkbox"/> Ich habe versehentlich einen anderen Punkt berührt. Andere: <hr/> <hr/>				

### Fragen zur akustischen Signalgebung über das Bone-Conduction-System

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
56	Die Lautstärke der akustischen Signale ist zu hoch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
57	Die Hörbarkeit der akustischen Signale ist zu gering.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
58	Das akustische Signal wurde erst nach zusätzlicher Anzeige auf dem Display korrekt erkannt/ gedeutet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
59	Das akustische Signal wurde direkt bei Wiedergabe korrekt erkannt/ gedeutet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
60	Das akustische Signal "Alarm" ist deutlich über das Bone-Conduction-System zu erkennen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
61	Das verwendete akustische Signal eignet sich für die Darstellung einer „Alarm“-Meldung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
62	Das akustische Signal "Warnung" ist deutlich über das Bone-Conduction-System zu erkennen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
63	Das verwendete akustische Signal eignet sich für die Darstellung einer „Warn“-Meldung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

64	Die akustischen Signale „Alarm“ und „Warnung“ sind problemlos zu unterscheiden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
65	Das akustische Signal der Meldung „Alarm“ wirkt dringlicher als das der Meldung "Warnung"	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Fragen zur visuellen Signalgebung über die LED-Brille**

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
66	Die visuellen Signale „Alarm“ und „Warnung“ sind problemlos zu unterscheiden.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
67	Das Signal "Alarm" wird über die Brille deutlich erkennbar dargestellt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
68	Wenn nicht "voll und ganz zutreffend", bitte erläutern:					

69	Das Signal "Warnung" wird über die Brille deutlich erkennbar dargestellt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
70	Wenn nicht "voll und ganz zutreffend", bitte erläutern:					

71	Die Leuchtstärke der LEDs war angemessen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
72	Wenn nicht "voll und ganz zutreffend", bitte erläutern:					

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
73	Das Sichtfeld wird durch Tragen der Brille erheblich eingeschränkt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
74	Die Brille erzeugte Druckstellen oder Schmerzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
75	Die Brille hat mich während meiner Arbeit behindert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
76	Wenn nicht "ganz und gar nicht zutreffend" bitte erläutern:					

**Fragen zum Gesamtsystem (Bone-Conduction-System, Display am Handgelenk und LED-Brille)**

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
77	Meine Aufmerksamkeit wurde beim Auftreten eines Signals direkt von der Arbeitsaufgabe auf das Warnsystem gelenkt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
78	Auch wenn keine Signale gegeben wurden, lenkte das Warnsystem von der gestellten Arbeitsaufgabe ab.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
79	Das Warnsystem wirkt auf mich vertrauensenerweckend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
80	Das Warnsystem schränkt die Bewegungsfreiheit ein.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
81	Ich könnte mir vorstellen, das vorgestellte Warnsystem über einen ganzen Arbeitstag (8 Stunden) zu tragen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
82	Wenn nicht "voll und ganz zutreffend": Was müsste geändert werden, damit Sie es über den ganzen Arbeitstag tragen würden?					

83	Was könnte man am Warnsystem verbessern?					
----	--	--	--	--	--	--

**Allgemeine Fragen zum Aufbau der Studie:**

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
84	Während der Bearbeitung der Arbeitsaufgabe habe ich bereits auf das nächste Signal gewartet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
85	Wenn nicht "ganz und gar nicht zutreffend", bitte erläutern:					

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
86	Die Zeit zur Bearbeitung der Arbeitsaufgabe war ausreichend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
87	Die Arbeitsaufgabe war eindeutig gestellt und gut umzusetzen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
88	Die Arbeitsaufgabe stellte eine Überforderung dar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
89	Die Arbeitsaufgabe forderte zur Bearbeitung meine volle Aufmerksamkeit.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
90	Die Arbeitsaufgabe war zu einseitig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
91	Die Arbeitsaufgabe war zu anstrengend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
92	Die Arbeitsaufgabe war zu einfach.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

		trifft voll und ganz zu				trifft ganz und gar nicht zu
93	Die Abstände zwischen den Signalen waren zu kurz.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
94	Die Displayhalterung am Handgelenk stellt bei Eingabe der Rückmeldung eine Behinderung dar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
95	Das Display ist zur Eingabe der Rückmeldung zu klein.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
96	Traten während der Untersuchung irgendwelche Besonderheiten/ Probleme auf?	Ja <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/>				
97	Falls Ja, bitte beschreiben Sie diese:					

**Sie haben das Ende des Fragebogens erreicht. Vielen Dank für Ihre Teilnahme!**